



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Telemática

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE UNA RED MALLADA WDM CON PLANO DE CONTROL

Autor: Gema Medina Toledo

Tutor: Manuel Ureña Pascual

Leganés, Octubre de 2015

Título: Diseño de una red mallada WDM con plano de control

Autor: Gema Medina Toledo

Director: Manuel Urueña Pascual

EL TRIBUNAL

Presidente: David Larrabeiti López

Vocal: José Alberto Hernández Gutiérrez

Secretario: Ana Isabel González-Tablas Ferreres

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 28 de Octubre de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

Fdo. Presidente

Fdo. Secretario

Fdo. Vocal

Agradecimientos

Gracias a mi familia por apoyarme en todo lo que emprendo, todos los retos son más fáciles de afrontar sabiendo que ellos siempre estarán ahí para respaldarme.

Gracias a todos aquellos que me han dado ánimos para afrontar este proyecto y, especialmente a Evaristo y Víctor, sin vuestro apoyo no hubiese sido posible.

Resumen

Este proyecto de fin de carrera presenta el diseño una red mallada con plano de control tomando como referencia el pliego de cláusulas técnicas publicado por la Junta de Castilla y León para implementar una red de transporte WDM que dé servicio a la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León.

El proyecto describe de las distintas opciones de diseño que cubren los requerimientos del pliego de cláusulas técnicas explicando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. De entre ellas se ha elegido la implementación basada en plano de control por delante de otras disponibles ya que es la que mejor responde a las necesidades de ancho de banda y a las expectativas de crecimiento de las redes actuales.

Finalmente se presenta el diseño de la red utilizando el equipamiento de uno de los fabricantes de este tipo de equipos, Ciena. Este diseño incluye presupuesto y planificación, detallando los pasos a seguir hasta su finalización y entrega al cliente

Palabras clave: DWDM, ASON, ROADM, OTN, interfaces ópticos, WSS, transpondedores, sistemas de gestión.

Abstract

The dissertation in this thesis discusses the design of a photonic meshed network with control plane, in accordance with the bid specifications published by the Junta de Castilla y León to deploy a WDM transport network to provide services for the Red Regional de Ciencia y Tecnología of Castilla y León.

This project describes different design approaches, included in the bid specifications, discussing their advantages and drawbacks. Among them, the chosen option has been the one based on control plane because it best fits the bandwidth requirements to cope with the expectations of future growth of this kind of networks.

Finally, the chosen network design has been implemented using Ciena equipment. This design includes quotation and roll-out planning, itemizing the required steps for its full completion and hand over.

Keywords: DWDM, ASON, ROADM, OTN, optical interfaces, WSS, transponders, management systems.

Índice General

1.	Introducción	13
1.1.	Motivaciones	13
1.2.	Objetivos	14
1.3.	Estructura de la Memoria	15
2.	Estado del arte	16
2.1.	Conceptos básicos tecnología WDM	16
2.1.1.	Estructura básica de un sistema WDM.....	17
2.1.2.	Modos de transmisión para sistemas WDM.....	17
2.1.3.	Sistemas DWDM y CWDM.....	18
2.1.3.1.	CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)	18
2.1.3.2.	DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)	19
2.1.4.	Ventajas de los sistemas WDM.....	19
2.2.	Medios de transmisión en sistemas WDM: fibras ópticas.....	20
2.2.1.	Tipos de fibra óptica.....	21
2.2.1.1.	Fibras monomodo.....	22
2.2.1.2.	Fibras multimodo	22
2.2.2.	Características básicas de una fibra óptica	23
2.2.2.1.	Atenuación	23
2.2.2.2.	Dispersión.....	24
2.2.2.3.	Efectos no lineales.....	25
2.3.	<i>Optical Transport Network (OTN)</i>	26
2.3.1.	Ventajas de las redes OTN	26
2.3.2.	Arquitectura OTN	29
2.3.3.	Capacidades de las tramas OTN.....	31
2.3.4.	Jerarquía de Multiplexación OTN.....	31
2.3.5.	Interfaces definidos para OTN	32
2.4.	Redes WDM malladas con plano de control	33
2.4.1.	Interfaces ópticos.....	34

2.4.1.1.	Modulación directa y modulación externa	35
2.4.1.2.	Modulación por desplazamiento de fase	36
2.4.1.3.	Detección Coherente.	38
2.4.1.4.	Multiplexación por división de polarización.....	39
2.4.1.5.	Tecnologías coherentes	41
2.4.2.	Multiplexores ópticos reconfigurables de extracción-inserción (ROADM)	42
2.4.2.1.	Características de un ROADM.....	43
2.4.2.2.	Wavelength Selective Switch (1xN WSS).	45
2.4.2.3.	Arquitectura <i>Broadcast and Select</i> y <i>Route and Select</i>	48
2.4.2.4.	ROADMs coloreados y no coloreados.....	49
2.4.2.5.	ROADM dirigidos y no dirigidos.....	51
2.4.2.6.	ROADMs sin contención	53
2.4.3.	Plano de control ASON (<i>Automatically Switched Optical Network</i>)	55
2.4.3.1.	Protocolos utilizados en el Plano de Control.....	57
2.4.3.2.	Protecciones en redes ASON	61
2.4.3.3.	Plano de control eléctrico y plano de control óptico	62
2.4.3.4.	Plano de control centralizado y plano de control distribuido	63
3.	Requisitos para el diseño de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León	65
3.1.	Introducción	65
3.1.1.	PROPUESTAS TÉCNICAS	66
3.1.1.1.	SOLUCIÓN BÁSICA	67
3.1.1.2.	SOLUCIÓN MEJORADA 1	72
3.1.1.3.	SOLUCIÓN MEJORADA 2.....	74
3.1.1.4.	SOLUCIÓN MEJORADA 3	76
3.1.1.5.	SOLUCIÓN MEJORADA 4.....	79
3.1.1.6.	SOLUCIÓN MEJORADA 5.....	82
4.	Implementación de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León	84
4.1.	Ciena y la familia de equipos 6500	84
4.2.	Equipamiento Óptico.....	88
4.2.1.	Arquitectura de los ROADMs.....	88
4.2.2.	Número de Canales	92
4.2.3.	Transpondedores	96
4.2.4.	Protecciones	101
4.3.	Requisitos del Plano de Control	102
4.4.	Requisitos del Sistema de gestión	105
5.	Planificación y Presupuesto	113

5.1.	Planificación.....	113
5.2.	Presupuesto	117
6.	Conclusiones y Trabajos Futuros	124
6.1.	Conclusiones	124
6.2.	Trabajos Futuros.....	125
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	127

Índice de figuras

Figura 1: Esquema básico de una red WDM [1].....	16
Figura 2: Unidades básicas de una red WDM.....	17
Figura 3: Componentes de una fibra óptica [2].....	20
Figura 4: Ley de reflexión [2] Figura 5: Ley de refracción o ley de Snell [2]	21
Figura 6: Fibras monomodo y multimodo [2].....	21
Figura 7: Valor del coeficiente de atenuación en función de la longitud de onda [2].....	24
Figura 8: OTN soporta distintos tipos de servicios sobre la misma longitud de onda [3].....	27
Figura 9: OTN puede actuar como capa de transporte para servicios de distinto tipo. [4]	27
Figura 10: Optical Transport Module (OTM) [3]	29
Figura 11: Estructura de línea OTN. [3]	30
Figura 12: Tipos y capacidad de OTU, ODU y OPU (a, b y c). [5].....	31
Figura 13: Jerarquía OTN [3].....	32
Figura 14: Interfaces de una red OTN [5]	33
Figura 15: Avances en la tecnología DWDM[6].....	35
Figura 16: Modulación directa y externa [7].....	36
Figura 17: Modulador Mach Zehnder y la modulación de fase resultante [6].	37
Figura 18: Modulación de High Order usando un modulador Super Mach-Zender [6].....	37
Figura 19: Receptor Coherente [6].	38
Figura 20: Polarización de la onda electromagnética [6].	40
Figura 21: Esquema de 100Gb/s, única portadora, transmisor PM-QPSK [6].....	40
Figura 22: Esquema de 100Gb/s, portadora dual, transmisor PM-QPSK [6].	41
Figura 23: <i>Wavelength Selectable Switch</i> (WSS) [8]	46
Figura 24: Módulo WSS construido con LCoS.	47
Figura 25: Módulo WSS construido con MEMS.	48
Figura 26: ROADM broadcast and select.	48
Figura 27: ROADM <i>route and select</i>	49
Figura 28: Estructura del Array Waveguide Grating [7].....	50
Figura 29: ROADM coloreado.....	50
Figura 30: ROADM no coloreado.....	51
Figura 31: ROADM dirigidos	52
Figura 32: ROADM no dirigidos	52
Figura 33: ROADM no coloreado, no dirigido y contentionless (Implementación 1).....	54
Figura 34: ROADM no coloreado, no dirigido y contentionless (Implementación 2).....	54
Figura 35: Relación entre plano de control y transporte en una red ASON [13]	56
Figura 36: Mapa de huella de los emplazamientos a conectar [17].	66
Figura 37: Vías soportadas y vías equipadas [17].	68
Figura 38: Solución básica.	69
Figura 39: Solución para llegar a 80 lambdas	70
Figura 40: Solución básica con protección.....	71

Figura 41: Solución mejorada 1.	72
Figura 42: Solución mejorada 1 con protección.....	73
Figura 43: Solución mejorada 2.	75
Figura 44: Solución mejorada 3.	77
Figura 45: Solución mejorada 3 con protección.....	78
Figura 46: Solución desacoplada.....	80
Figura 47: Protección SNCP.	81
Figura 48: 6500-2 utilizado para implementar un amplificador [18].	85
Figura 49: 6500-7 utilizado para implementar un ROADM [18].....	85
Figura 50: 6500-14 utilizado para implementar un ROADM [18].....	86
Figura 51: 6500-32 utilizado para permitir la conmutación de paquetes y OTN [18]	86
Figura 52: ROADM <i>directionless</i> de 4 vías implementado con tarjetas de Ciena.....	89
Figura 53: ROADM <i>directionless</i> de 3 vías implementado con tarjetas de Ciena.....	90
Figura 54: ROADM <i>directionless</i> de 2 vías implementado con tarjetas de Ciena.....	91
Figura 55: ROADM direccional de grado 1 implementado con tarjetas de Ciena.....	92
Figura 56: Solución de 88 lambdas con WSS9x1	93
Figura 57: Solución de 88 lambdas con BMD2	94
Figura 58: Solución de 16 lambdas con CMD44	95
Figura 59: Solución de 16 lambdas con CMD12	96
Figura 60: Matriz de tráfico de 10G (a, b y c).....	98
Figura 61: Matriz de tráfico 1G (a y b)	99
Figura 62: Configuración tráfico de 1G.	99
Figura 63: Solución tráfico de 100G con tarjetas 10x10G ó 10x10G multi.....	100
Figura 64: Solución tráfico de 100G con XC I/F.	101
Figura 65: Protección 1+1 capa óptica.....	101
Figura 66: Plano de control eléctrico [12].....	104
Figura 67: OneControlGestor de Ciena [19]	106
Figura 68: Visión panel principal del gestor OneConnect.[19].....	107
Figura 69: Visión general de las alarmas en OneConnect.[19]	108
Figura 70: Visión general de la gestión de los equipos en OneConnect. [19].....	108
Figura 71: Visión general del histórico de alarmas en OneConnect. [19].....	109
Figura 72: Visión de los equipos con provisión restringida en OneConnect. [19].....	109
Figura 73: Visión general del estado de la fibra en OneConnect. [19]	109
Figura 74: Visión general de la topología de red en OneConnect. [19]	110
Figura 75: Sistema de gestión con Alta Disponibilidad. [19]	111

Índice de tablas

Tabla 1: Presupuesto ROADM de 4 vías	117
Tabla 2: Presupuesto ROADM de 3 vías	118
Tabla 3: Presupuesto ROADM de 2 vías	118
Tabla 4: Presupuesto ROADM de 1 vías	118
Tabla 5: Presupuesto solución de 44 <i>lambdas</i>	119
Tabla 6: Presupuesto solución de 16 <i>lambdas</i>	119
Tabla 7: Presupuesto solución de 88 <i>lambdas</i>	119
Tabla 8: Presupuesto canales de 10G.....	120
Tabla 9: Presupuesto canales de 1G.....	120
Tabla 10: Presupuesto protección 1+1	120
Tabla 11: Presupuesto armazones	121
Tabla 12: Presupuesto tarjetas auxiliares	121
Tabla 13: Presupuesto implementación Plano de Control.....	121
Tabla 14: Presupuesto servidores.....	122
Tabla 15: Presupuesto aplicación OneControl	122
Tabla 16: Presupuesto licencias OneControl.....	122
Tabla 17: Presupuesto total del equipamiento.....	122
Tabla 18: Presupuesto instalación	123
Tabla 19: Coste total del proyecto.....	123

1.Introducción

1.1. Motivaciones

En los últimos años las redes de telecomunicaciones han sufrido un crecimiento exponencial en el volumen de tráfico que soportan, debido a que la demanda de servicios de telecomunicaciones crece y se diversifica.

Son varios los factores que han influido en este incremento. Por un lado se encuentra el auge del consumo de vídeo a través de redes fijas y móviles. Se calcula que el tráfico de internet crecerá entre un 40 y un 50 por ciento en los próximos años [6], y de este dos tercios incluirán algún tipo de video. Por otro lado se encuentran las aplicaciones basadas en la nube y sus grandes necesidades de capacidad, y los servicios bajo demanda en los que el cliente cada día espera vivir experiencias de más alta calidad.

No debemos olvidar que este auge ha coincidido con tiempos difíciles para las operadoras. Hay grandes recortes de presupuestos que dificultan los nuevos despliegues y los precios que los consumidores pagan por los servicios son cada vez más bajos. Todo ello hace que más que invertir en nuevos despliegues, lo que se esté buscando es rentabilizar las inversiones ya realizadas mediante la optimización de los recursos existentes.

Estos nuevos usos de las redes de telecomunicaciones afectan a los diferentes niveles que la conforman, entre ellos las redes de transporte que son, el objeto de análisis de este proyecto. Para lograr adaptarse a estos cambios, las redes de transporte han sufrido una importante evolución en muchos aspectos.

En primer lugar la topología. Se ha pasado de redes con equipos conectados en anillo o punto a punto, a redes con los equipos interconectados en una topología de malla. Este cambio ha estado motivado por los requisitos de los nuevos servicios transportados, que requieren de protecciones mucho más robustas que no pueden ser implementadas en las redes con topologías tradicionales.

Desde el punto de vista operacional, la naturaleza estática de las redes de transporte tradicional implicaba tiempos de provisión muy largos, incompatible con los patrones dinámicos asociados a los nuevos usos de las redes de telecomunicaciones. Para superar estas limitaciones, se desarrollaron las redes ASON (*Automatically Switched Optical Network*) que, gracias a su plano de control proporcionan caminos adecuados para el tráfico de una manera rápida y sin necesidad de ningún cambio hardware. También permite automatizar las operaciones de gestión y mantenimiento de la red, para así poder responder en menor tiempo al incremento de la demanda de red y a las necesidades de los nuevos servicios soportados por las mismas.

Otra de las estrategias adoptadas para adaptarse a los requisitos de las nuevas redes es la utilización de la tecnología OTN (*Optical Transport Network*), concebida para poder encapsular en una misma trama diferentes tipos de tráfico (Ethernet, SDH, video, etc) de manera transparente. Esta capacidad de adaptación hace de OTN la tecnología adecuada para que los suministradores pueden modernizar sus redes de un manera progresiva y, por tanto, con menos coste e impacto en sus operaciones.

Por tanto, y ante la relevancia que están tomando las redes malladas con plano de control, se ha decidido realizar este proyecto, en el que se recoge todo el proceso de diseño de una red de este tipo, desde el momento en que se hacen públicos los requisitos del cliente hasta la implementación final por parte del suministrador.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el de diseñar una red mallada WDM con plano de control. Como ya se ha explicado, esta es la solución que más se ajusta a las necesidades actuales de las redes de transporte.

Para ello, se va a realizar una pequeña introducción tanto a los conceptos básicos de las redes WDM, como a los elementos principales que forman parte de una red de transporte, la aplicación de los mismos y las ventajas e inconvenientes de cada uno.

Con el objetivo de dar una visión real, se utilizará como referencia los requisitos técnicos de un proyecto público y actual, la RFQ (*Request for Quotation*) creada por la Junta de Castilla y León para implementar una red de transporte WDM que dé servicio a la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León.

Se ha decidido utilizar esta RFQ frente a otras opciones disponibles ya que al ser reciente (fue publicada en el BOE el pasado día 7 enero de 2015) nos permite hacernos una idea clara de la situación actual del mercado. Además, el hecho de ser una RFQ publicada por un estamento público hace que la información esté disponible a todo el mundo y que por tanto se haya podido utilizar todos los datos que aparecen en ella sin tener que recurrir a estimaciones o datos aproximados. Por todo ello y al tratarse de un caso real, nos permitirá hacernos una idea completa del proceso que conlleva diseñar una nueva red de transporte, enfrentarnos al desarrollo de un nuevo proyecto con las mismas condiciones con las que los distintos suministradores se enfrentan a ello, y así entender los obstáculos que se encuentran y dar los mismo pasos hasta llegar al diseño final

Una vez se haya llegado a la configuración considerada como óptima, se diseñará una implementación completa de la red utilizando los equipos de uno de los suministradores de este tipo de equipos, en este caso Ciena. De esa manera se dotará al proyecto de un ejemplo de implementación de red auténtico, en el que se explicará detalladamente las configuraciones, el hardware utilizado, los protocolos usados y las herramientas disponibles para una mejor gestión de la red.

1.3. Estructura de la Memoria

Capítulo 1: Motivación y objetivos. En este primer capítulo se ha hecho una descripción de la motivación y objetivos de este proyecto. Con ello se ha querido justificar la evolución de las redes de transporte tradicionales a las más utilizadas actualmente, redes malladas con plano de control.

Capítulo 2: Estado del Arte. En este capítulo se presenta un resumen de los conceptos básicos de las tecnologías DWDM y OTN para terminar haciendo especial hincapié en los principales fundamentos, tecnologías y componentes utilizados para implementar redes malladas con plano de control (ASON), el objetivo de este proyecto.

Capítulo 3: Requisitos de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León. En este capítulo se estudiará la RFQ creada por la Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León para obtener el equipamiento de Multiplexación Óptica para la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León. Se explicitan las distintas soluciones que se podrían implementar para dar respuesta a los requisitos expuestos en el texto, explicando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Capítulo 4: Diseño de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León. En este capítulo se expone el proceso de diseño de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León utilizando el equipamiento del suministrador Ciena, explicando para cada uno de los aspectos las distintas opciones y eligiendo la más adecuada a los requisitos de la red.

Capítulo 5: Planificación y Presupuesto. En este capítulo se realizará una planificación del proyecto en el que se explican las tareas más importantes para completar el proyecto y su duración aproximada. Por otro lado, se realiza una estimación del presupuesto necesario para implementar la red explicada en el capítulo 4 basado en el catálogo de precios de Ciena.

Capítulo 6: Conclusiones y Trabajos Futuros. En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas tras el análisis y el diseño de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León. También se explicarán los trabajos futuros que se podrían implementar en la red, teniendo en cuenta la evolución previsible de las tecnologías.

2. Estado del arte

En este capítulo se explicarán en primer lugar los conceptos básicos en los que se basa la tecnología WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*) para posteriormente explicar los elementos básicos que constituyen las redes ASON (*Automatically Switched Optical Network*) en las que se basará este proyecto.

2.1. Conceptos básicos tecnología WDM

Con el desarrollo de las redes de telecomunicaciones, las necesidades de capacidad en las redes de transmisión han aumentado notablemente, tanto que las tecnologías tradicionales como PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) no las han podido satisfacer. Ha sido como respuesta a estas necesidades cuando ha emergido la tecnología WDM.

La tecnología WDM utiliza las propiedades de refracción de la luz para enviar varias señales ópticas en una sola fibra usando distintas longitudes de onda. Asigna cada señal óptica que le llega a una frecuencia específica de luz, llamadas longitudes de onda o lambdas, dentro de una determinada banda de frecuencia. Esto le permite establecer varios canales de comunicación en paralelo por la misma fibra.

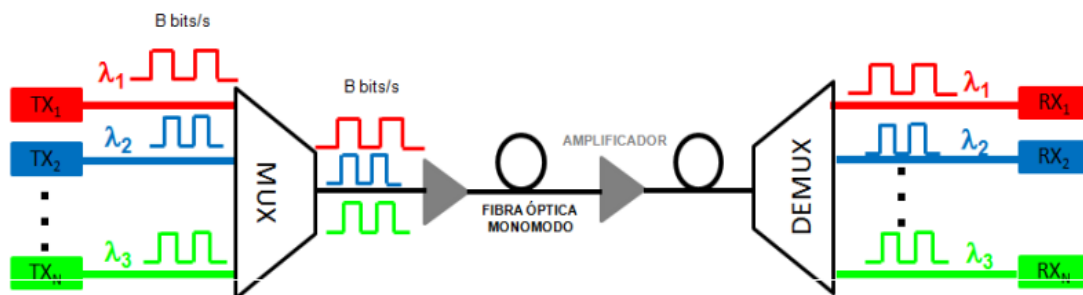


Figura 1: Esquema básico de una red WDM [1]

Las señales digitales transportadas en distintas longitudes de onda pueden transportar datos con independencia del formato, tasa y protocolos, lo que hace WDM una tecnología transparente de cara a las señales cliente.

Frente a otras tecnologías que aumentaban la capacidad de la línea a costa de aumentar el número de fibras y equipos, como *Space-Division Multiplexing* (SDM), o haciendo más caras y complicadas las redes como *Time-Division Multiplexing*, (TDM), la tecnología WDM mantiene la misma fibra óptica y las misma tasa de bit individual, pero multiplica la eficiencia de transporte de una línea permitiendo enviar varias señales ópticas por un mismo camino.

2.1.1. Estructura básica de un sistema WDM

La Figura 2 muestra la estructura básica de un sistema WDM, que está formado por los siguientes elementos:

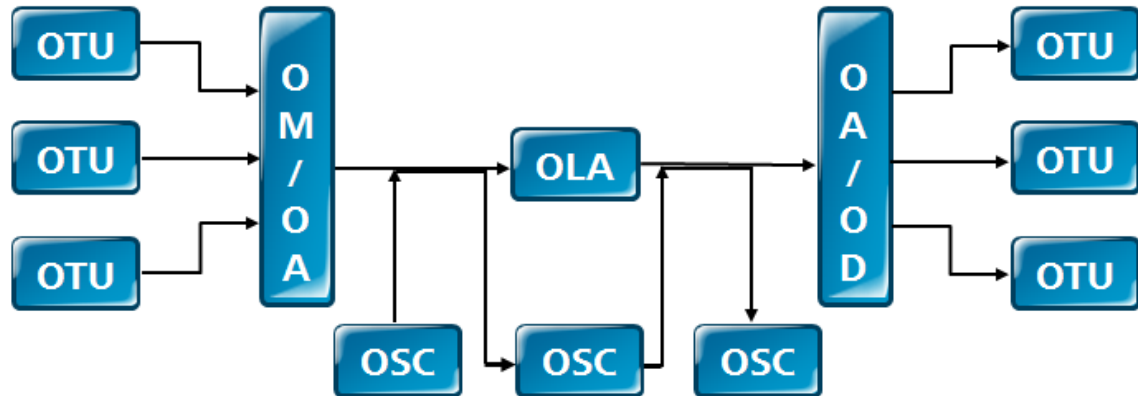


Figura 2: Unidades básicas de una red WDM

Transpondedor Óptico (OTU). Son los módulos a través de los que accede el servicio del cliente. Se encarga de la conversión a longitudes de onda, cumpliendo con los estándares del ITU, y de la corrección de los errores producidos durante la propagación.

Nos podemos encontrar con sistemas que trabajan con transpondedores (WDM abierto) o con sistemas que no lo hacen (sistemas WDM integrados). Este último tipo de sistemas no utilizan la tecnología de conversión de longitud de onda, sino que el cliente entrega directamente las señales coloreadas, cumpliendo con los estándares del sistema.

Multiplexador Óptico (OM). Une varias señales de distintas longitudes de onda en un mismo camino.

Demultiplexador Óptico (OD). Divide un único canal en varias señales individuales.

Amplificador de Señal Óptica (OA/OLA). Debido a las atenuaciones que sufre la señal cuando viaja por la fibra, la distancia que puede recorrer con potencia suficiente para ser detectada es limitada. Los amplificadores ópticos permiten amplificar toda la señal de una vez sin tener que hacer una conversión OEO (óptico-eléctrico-óptico). Se debe tener en cuenta que también amplifican el ruido, por lo que su uso está limitado.

Canal de Supervisión Óptica (OSC). Se establece para la supervisión de sistemas WDM. Generalmente se usa la λ de 1510nm, que por lo tanto no se puede emplear para el envío de datos.

2.1.2. Modos de transmisión para sistemas WDM

Los sistemas WDM pueden adoptar dos distintos modos de transmisión:

Transmisión bidireccional. El sistema utiliza una única fibra que transmite señales en ambas direcciones simultáneamente, de manera que señales de distinta dirección deben estar asignadas a distintas longitudes de onda.

Transmisión unidireccional. Estos sistemas necesitan dos fibras ópticas ya que en cada fibra sólo se implementa la transmisión de la señal en una dirección, necesitando otra fibra para realizar la transmisión en la otra dirección. Este es el modo más usado ya que permite una mayor capacidad al evitar bandas de guarda entre ambas direcciones.

2.1.3. Sistemas DWDM y CWDM

Actualmente existen dos tipos de sistemas WDM: DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) y CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*).

2.1.3.1. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

La multiplexación por división en longitudes de onda ligera (CWDM), se caracteriza por un mayor espaciado entre canales que en la tecnología DWDM. Trabaja en la banda de los 1270nm a los 1610nm con un espaciado de 20nm, por lo que sólo podrá multiplexor de 2 a 16 longitudes de onda.

Las principales diferencias entre estos sistemas y los sistemas DWDM son dos:

Mayor espaciado entre longitudes de onda. Esto permite que se puedan utilizar láseres con mayor ancho de banda y no estabilizados en temperatura, es decir, la longitud de onda central podrá desplazarse debido a imperfecciones de fabricación o a cambios en la temperatura del láser y aún así seguir en banda. Todo esto permite el uso de láseres con procesos de fabricación menos complicados y por tanto, más baratos que los usados en DWDM.

Mayor espectro óptico. Lo que permite que el número de canales que pueden utilizarse no disminuya radicalmente a pesar de que aumente la separación entre ellos. Esto es posible gracias a que en CWDM no se usan los amplificadores ópticos tipo EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier* como ocurre en DWDM para distancias mayores a 80 km. Los EDFA se usan antes de transmitir o recibir de la fibra óptica para amplificar la potencia de todos los canales simultáneamente sin que haga falta ningún tipo de regeneración eléctrica, por lo que no pueden ser usados para estructuras CWDM ya que no tiene un ancho de banda tan grande como el que estas estructuras necesitan. En el caso de CWDM sí es necesario utilizar regeneración, cada canal sufre una conversión óptico-eléctrico-óptico de forma independiente para ser amplificado.

Además de todo esto, CWDM es más sencillo en cuanto al diseño de red, implementación y operación. Por lo tanto, los sistemas CWDM se suelen utilizar en las redes de transporte metropolitanas y como plataforma integrada para una gran diversidad de clientes, servicios y protocolos.

2.1.3.2. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

DWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1530-1565nm). Usa varias longitudes de onda como portadoras y permite que la señal sea transmitida simultáneamente sobre ellas en la fibra óptica. Además de aumentar drásticamente la capacidad de la red, tiene otras múltiples ventajas como son la facilidad a la hora de realizar expansiones en la red, su fiabilidad y especialmente el hecho de que pueda transportar directamente distintos tipos de servicios.

A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue un mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM (*Dispersion Compensation Modules*). De esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos.

Se pueden conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz respectivamente. El filtrado óptico se usa para evitar solapes o interferencias entre canales, ya que el ancho de banda de las señales aumenta con la tasa de símbolo, pudiendo exceder el ancho de banda asignado a dicho canal dentro de la fibra.

El campo de aplicación de DWDM se encuentra en redes de larga distancia de banda ultra-ancha, así como en redes metropolitanas o interurbanas de muy alta velocidad. Como explicamos anteriormente, la tecnología CWDM no se puede amplificar y por tanto para enlaces a partir de 80 km es necesario utilizar DWDM.

2.1.4. Ventajas de los sistemas WDM

Las principales ventajas de un sistema WDM respecto a sistemas previos basados en TDM son:

Capacidades de transmisión mayores. El ancho de banda que se puede transmitir en una fibra tradicional es muy amplio, pero el coeficiente de utilización es aún bajo. Utilizando la tecnología WDM la capacidad de transmisión de una única fibra aumenta decenas o incluso cientos de veces comparadas con la capacidad de un sistema de una única fibra.

Transmisión transparente. La señal cliente es transportada sin que se tenga visibilidad de cuál ha sido la longitud de onda en la que se ha transportado o la distancia del enlace. Cada canal óptico puede llevar cualquier formato de transmisión. No cambia ni la estructura ni ningún bit de la señal de cliente

Transmisión de larga distancia. Permite enviar señales a 5000km sin regeneración OEO siendo el salto más largo de 230km entre amplificadores ópticos.

Compatible con las fibras ópticas actuales. No es necesario cambiar las fibras ópticas para establecer o expandir la red, es suficiente con cambiar los transmisores y receptores.

Redes flexibles, económicas y robustas. Comparadas con las redes tradicionales, las nuevas redes basadas en tecnología WDM son mucho más simples y tienen una estructura mucho más clara. La implementación de servicios es mucho más fácil. Simplemente tienes que ajustar la longitud de onda correspondiente de la señal óptica, sin afectar a otros servicios ya existentes.

2.2. Medios de transmisión en sistemas WDM: fibras ópticas

Una fibra óptica es una guía de onda de óxido de silicio, cilíndrica y muy delgada. Se divide en un material interior que forma el núcleo y un revestimiento de cristal, todo ello rodeado de un recubrimiento exterior que sirve como protección. (Figura 3).

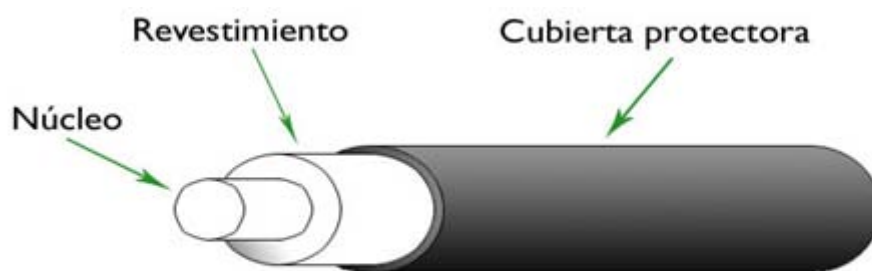


Figura 3: Componentes de una fibra óptica [2]

Las fibras ópticas basan su funcionamiento en las leyes de refracción de la luz. Cuando un rayo de luz incide en la superficie de separación de dos medios transparentes distintos, parte de la luz resulta reflejada, quedándose en el primer medio, y otra parte resulta refractada penetrando en el segundo medio.

La **ley de la refracción o ley de Snell** establece que para dos medios caracterizados por sus índices de refracción n_1 y n_2 y separados por una superficie S , los rayos refractarán en la superficie variando su dirección de propagación dependiendo del cociente entre los índices de refracción.

Tendremos que para un rayo con un ángulo de incidencia θ_1 , ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, sobre el primer medio, el rayo que se propaga en el segundo medio lo hará con un ángulo de refracción θ_2 cuyo valor se obtendrá de la fórmula:

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

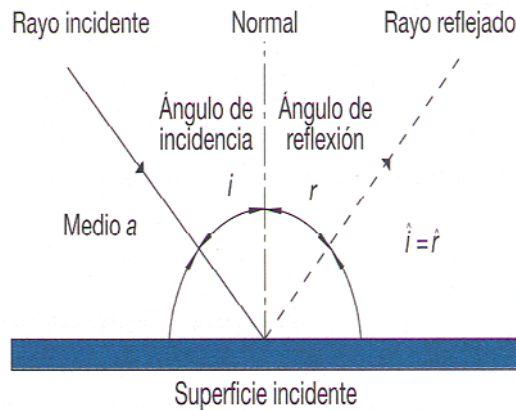


Figura 4: Ley de reflexión [2]

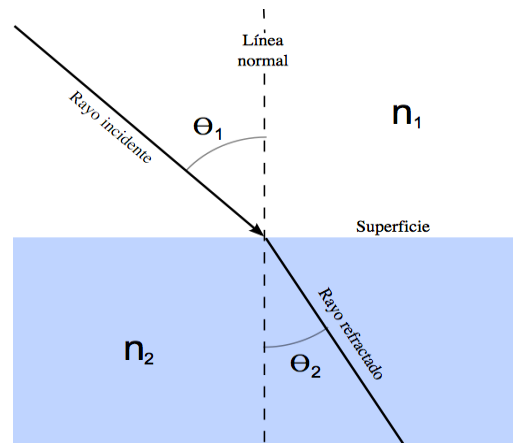


Figura 5: Ley de refracción o ley de Snell [2]

Las fibras ópticas se construyen basándose en la reflexión total. Esta ley explica que, un rayo de luz que se propaga por un medio con índice de refracción n_1 y que incide con un ángulo θ_1 sobre la superficie de un medio con índice n_2 , si se cumple que $n_1 > n_2$, puede reflejarse totalmente en el interior del medio de mayor índice de refracción en el caso de que el ángulo de incidencia θ_1 sea mayor que un valor crítico definido por la fórmula

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

La luz que va por dentro de la fibra sufrirá una reflexión total cada vez que intenta salir del núcleo y entrar en la cubierta. Si el núcleo de la fibra y el de la cubierta tienen índices de refracción distintos y el ángulo con el que entran los rayos de luz del núcleo a la cubierta es mayor que el ángulo crítico, la luz irá rebotando sin salirse del núcleo.

2.2.1. Tipos de fibra óptica

Teniendo en cuenta el tamaño del núcleo y del revestimiento de la fibra óptica las fibras se pueden clasificar en: fibras monomodo y multimodo.

Para analizar los distintos tipos de fibras ópticas es necesario tener claro el concepto de modos de propagación. Recibe el nombre de modos de propagación las distintas trayectorias que puede seguir un haz de luz.

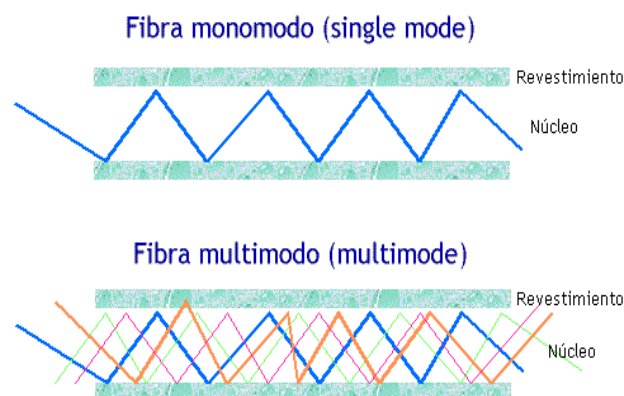


Figura 6: Fibras monomodo y multimodo [2]

2.2.1.1. Fibras monomodo

Cuando el diámetro del núcleo de la fibra es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda óptica, la fibra permite solamente un modo de propagación y atenúan el resto. Estas fibras reciben el nombre de fibras monomodo. El diámetro del revestimiento es igual que en las fibras multimodo 125 μ m, pero el diámetro del núcleo es mucho menor, unos 9 μ m.

La principal ventaja de las fibras monomodo es que eliminan la dispersión modal, por lo que la compensación de la dispersión es mucho más sencilla.

Gracias a sus ventajas (baja atenuación, gran ancho de banda, reemplazos y expansiones rápidas y de bajo coste) se ha acordado internacionalmente que los sistemas DWDM utilicen las fibras monomodo como medio de transmisión. La ITU-T ha definido cuatro fibras en sus recomendaciones:

G.652. Esta fibra está optimizada para el uso de la banda en torno a los 1310nm, puesto que en esta banda tiene valores de dispersión en torno a cero. También puede usarse en la banda de los 1550nm pero no está optimizada para ello. Puede usarse tanto para transmisión analógica como digital.

G.653. También llamada fibra de dispersión desplazada, está optimizada para su uso en la banda entorno a los 1510nm para la que su dispersión es cero. En la actualidad este tipo de fibra no se usa ya que una dispersión tan baja maximiza los efectos no lineales durante la propagación

G.654. También llamada fibra con núcleo de óxido de silicio. Tiene una atenuación menor que las fibras G.652 y G.655 en torno a los 1550nm. Su punto de dispersión cero está aún cerca de los 1310nm. Está optimizada para el uso en la región 1530-1623nm. Se puede usar para aplicaciones de transmisión digital de larga distancia, sistemas de líneas terrestres de largo recorrido y sistemas de cable submarino usando amplificadores ópticos.

G.655. Optimizada para el uso en la región entre los 1550nm y los 1600nm, presenta una dispersión menor que la G.652 pero no tan baja como la G.653, suprimiendo el efecto no lineal conocido como “mezcla de cuatro ondas” que puede ser perjudicial en sistemas WDM y facilitando la compensación de la dispersión cromática.

2.2.1.2. Fibras multimodo

Cuando el diámetro del núcleo de la fibra es bastante mayor que la longitud de onda óptica (alrededor de 1.5 μ m) habrá decenas o incluso miles modos de transmisión dentro de una misma fibra óptica. Las fibras multimodo tienen un diámetro del núcleo en torno a los 50-62,5 μ m y un revestimiento de unos 125 μ m. Al tener un núcleo grande es más fácil de fusionar y por tanto, tiene mayor tolerancia a componentes de menor precisión, por lo que permite el uso de componentes electrónicos de bajo coste.

Debemos tener en cuenta que para distintos modos de propagación la velocidad de propagación será distinta. La señal de entrada estará dividida entre los distintos modos

propagantes, que se propagan a distintas velocidades dependiendo de la geometría y material de la fibra. Los haces de luz enviados a distintas frecuencias no llegarán a su destino a la vez, provocando el retardo y la consiguiente expansión del pulso para largas distancias. Este fenómeno es conocido como dispersión y se explicará más adelante. Este tipo de fibras se usarán en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km, distancia para la cual el efecto de la dispersión aún no supone un problema.

2.2.2. Características básicas de una fibra óptica

Las características más importantes que debemos tener en cuenta a la hora de clasificar una fibra óptica son la atenuación y la dispersión.

2.2.2.1. Atenuación

La atenuación se refiere a la paulatina disminución de potencia de la señal óptica a medida que aumenta la longitud de la fibra, expresada en dB/km. Este fenómeno limita la distancia de propagación de la señal óptica sin amplificación.

Los factores que influyen en la atenuación de la fibra se pueden dividir en:

Factores internos, derivan del proceso de fabricación de las fibras y no pueden ser compensados durante la instalación. Las más importantes se deben a la Dispersión de *Rayleigh* y a las pérdidas de absorción.

- **La dispersión de *Rayleigh*** se produce por las fluctuaciones de densidad que podemos encontrar en las fibras. La propagación de una onda electromagnética través de un material no uniforme induce interacciones elásticas (sin pérdida de energía) entre el material y la onda que producen una reflexión parcial de esta última. Su importancia depende del material usado en la construcción de la fibra, aunque actualmente son causantes del 90% de las pérdidas. Su influencia disminuye conforme aumenta la longitud de onda.
- **Las pérdidas por absorción** se deben a impurezas durante el proceso de fabricación y a las moléculas de OH que quedan en el interior de la fibra, o que son absorbidas durante la vida útil de la fibra, y que absorben parte de la luz transformándola en calor, atenuando por tanto la luz a medida que atraviesa la fibra óptica. Al contrario que la dispersión *Rayleigh* su importancia aumenta conforme lo hace la longitud de onda.

La atenuación mínima debida a estos dos factores se produce en torno a los 1550nm, aumentando ambas con la distancia recorrida.

Factores externos, aparecen por procedimientos defectuosos durante la instalación de la fibra. Las causas más habituales son las deformaciones mecánicas y la suciedad en los conectores:

- Las **deformaciones** más importantes son las curvaturas. Debido a ellas se producen pérdidas de luz, ya que algunos rayos no experimentan reflexión total y por tanto se escapan del núcleo. Estas pérdidas son prácticamente constantes para cualquier longitud de onda.

Se ha definido un parámetro para caracterizar todas estas pérdidas, que recibe el nombre de coeficiente de atenuación. En el siguiente gráfico aparece reflejado el valor de este coeficiente en función de la longitud de onda, así como su relación con los factores de dispersión descritos anteriormente.

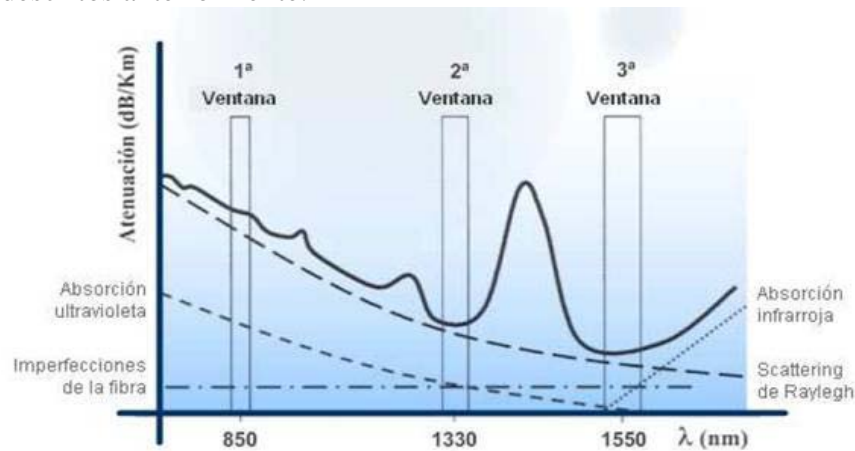


Figura 7: Valor del coeficiente de atenuación en función de la longitud de onda [2]

2.2.2.2. Dispersión

Como ya hemos mencionado anteriormente, los distintos modos y frecuencias que componen un pulso óptico se propagan a distinta velocidad, por lo que llegarán al final de la fibra en distinto momento. Esto provoca un ensanchamiento del pulso. Este fenómeno recibe el nombre de dispersión y se expresa en ps/nm km.

La dispersión normalmente se expresa en diferencia de retardo, que refleja la diferencia de tiempo requerido entre la componente frecuencial más rápida y la más lenta para recorrer una distancia dada.

La dispersión de una fibra se divide en tres componentes: dispersión modal, dispersión cromática y dispersión por modo de polarización:

- **Dispersión modal.** Aparece asociada a fibras multimodo. Los haces de luz que se propagan en los distintos modos tienen una velocidad de propagación distinta y, por tanto, distinto retardo en la transmisión. La dispersión que se origina por esta causa se llama dispersión modal.
- **Dispersión cromática (CD).** Las distintas longitudes de onda que componen una fuente de luz también se propagan a distinta velocidad y, por tanto, los haces de luz con distintas frecuencias tendrán distintos retardos en la transmisión. La dispersión provocada por esto recibe el nombre de *dispersión cromática*. Dentro de ella se incluyen :
 - **Dispersión material.** Es el principal causante de la dispersión. Se basa en que el índice de refracción de los materiales varía con la frecuencia de las señales ópticas, de modo que distintas longitudes de onda se propagaran a distintas velocidades.

- **Dispersión por guiado de onda.** La potencia de un modo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento de la fibra, de manera que el índice efectivo del modo varía dependiendo del porcentaje de potencia que se propaga por ellos. A su vez, la distribución de la potencia depende de la longitud de onda y de la geometría de la fibra. Si estos cambian, la distribución de potencia también lo hace, provocando un cambio en el índice efectivo o constante de propagación del modo.
- **Dispersión por modo de polarización (PMD).** Cuando una fibra es perfectamente circular, la constante de propagación de las polarizaciones principales es la misma y por tanto también lo es la velocidad de propagación de cada polarización. Las asimetrías de la fibra hacen que las componentes de la luz se propaguen a diferente velocidad, y por tanto que ambas componentes se reciban en un instante de tiempo distinto.

Estas distintas velocidades provocan un ensanchamiento del pulso, que puede llegar incluso a provocar interferencias intersimbólicas en caso de usar altas tasas de símbolo.

2.2.2.3. Efectos no lineales

Todos los medios son no lineales por naturaleza, aunque la mayoría de los efectos no lineales son imperceptibles. Sin embargo se ha demostrado que al sobrepasar velocidades de transmisión de 10 Gb/s y al trabajar con altas potencias, el canal de comunicación ya no puede considerarse como un medio lineal.

Los efectos no lineales de la fibra aparecen principalmente al aplicarles niveles de potencia excesivos que provocan la presencia de campos electromagnéticos intensos.

Dentro de los efectos no lineales se pueden diferenciar dos grupos: los relacionados con la dependencia del índice de refracción con la intensidad de los pulsos transmitidos, que provocan una modulación de fase; y aquellos relacionados con los fenómenos dispersión *Brillouin* que conducen a una disminución del nivel de potencia dentro de la fibra.

También se debe tener en cuenta un fenómeno no lineal llamado se llama modulación de fase cruzada o *Cross-Phase Modulation* (XPM), que se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la misma fibra óptica. El índice de refracción efectivo para una onda incidente no depende sólo de la intensidad de esa onda, sino que también depende de la intensidad de cualquier otra onda que se propague a través del canal debido a la interferencia entre ellas. La XPM afecta al rendimiento general de la transmisión y el resultado puede ir desde pérdidas en el enlace hasta a tener que separar más las señales, con la consiguiente pérdida de espectro.

2.3. *Optical Transport Network* (OTN)

Como se ha comentado anteriormente, en los últimos años las redes de comunicación han experimentado un crecimiento exponencial del ancho de banda que soportan, debido principalmente a la amplia gama de servicios digitales disponible, y al uso tan extendido que se está haciendo de ellos. Se prevé que este ritmo de crecimiento siga la misma tendencia en los próximos años, por lo que gran parte de los esfuerzos del sector se concentran en conseguir redes que puedan responder a esa demanda. Esto requiere que el precio por gigabit de información transmitida se reduzca para hacer frente al crecimiento sostenible en el tiempo.

Como parte de esta estrategia de desarrollo, y apoyándose en los progresos de los sistemas micro-electromecánicos y los sistemas basados en cristales ópticos, las redes de transporte están evolucionando hacia redes completamente ópticas. Estos dispositivos aportan grandes beneficios a las redes de comunicación gracias a la escalabilidad y alta velocidad que los caracteriza.

Dentro de las tecnologías que se han desarrollado para responder a estas necesidades se encuentra OTN, *Optical Transport Network*. OTN es una jerarquía estandarizada por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU) para permitir interoperabilidad entre sistemas de los diferentes fabricantes. Esto se consigue mediante la definición de una jerarquía de capas ópticas con un formato de trama bien definido en cada una de ellas.

Las redes OTN se concibieron con el objetivo de combinar las ventajas de las tecnologías SDH/SONET con la flexibilidad de las redes DWDM, aumentando así la capacidad del ancho de banda que puede transportarse en estas.

Son varios los estándares en los que se recogen las especificaciones de las redes OTN. En la recomendación G.872 [15] se describe la arquitectura de la nueva tecnología de transporte para las Redes Ópticas de Transporte OTN, la denominada *Optical Transport Hierarchy* (OTH). En la recomendación G.709 [5] se describen el formato y la estructura de la trama OTN, y en la recomendación G.798 [16] se explican las características de los bloques funcionales de los equipos que forman una red OTN.

En el año 2009 ya estaba claro que era necesario que las tramas OTN soportasen también tráfico Ethernet, por lo que se hizo una revisión de los estándares y se alinearon más estrechamente con las características de este tráfico. Estos cambios han hecho de OTN un protocolo ideal para transportar tráfico Ethernet sobre redes DWDM.

2.3.1. Ventajas de las redes OTN

OTN introduce la carga útil de cada cliente de manera transparente en un contenedor para poder transportarla a través de las redes ópticas, manteniendo la estructura original de la señal cliente, la información de gestión y del sincronismo.

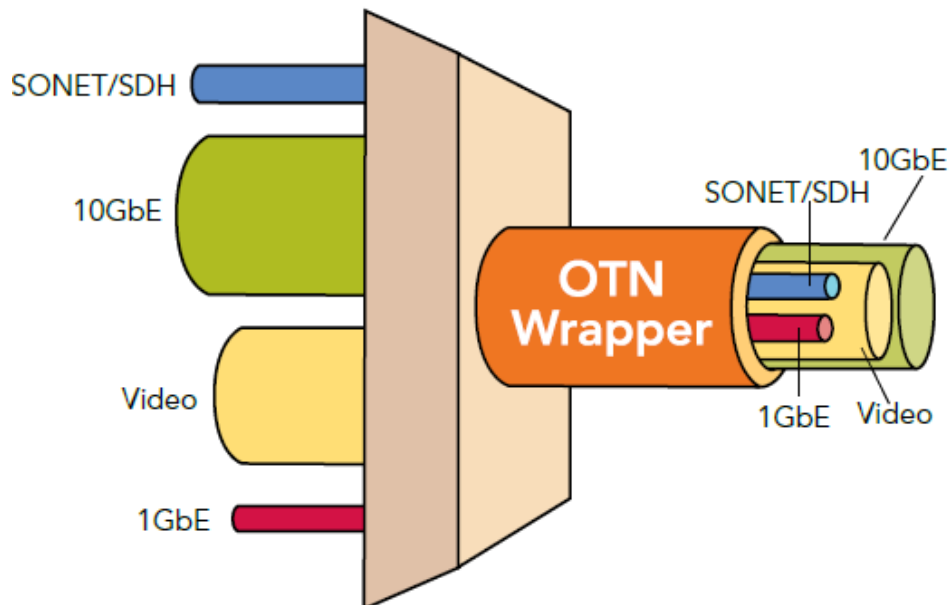


Figura 8: OTN soporta distintos tipos de servicios sobre la misma longitud de onda [3].

Esto significa que cualquier cliente, dispositivo de almacenamiento, servicio Ethernet, SDH/SONET, etc puede ser multiplexado en una longitud de onda OTN. Esta capacidad de adaptación hace de OTN la tecnología óptima para que los operadores puedan modernizar sus redes. El hecho de permitir la convivencia de señales SDH con otro tipo de señales permite que poder hacer una evolución progresiva, lo que supone un menor coste e impacto.

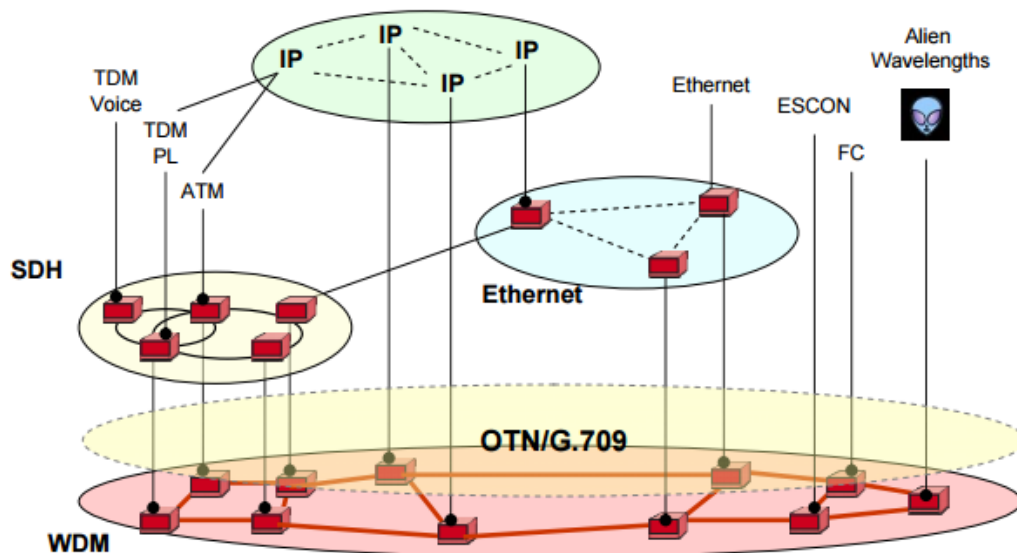


Figura 9: OTN puede actuar como capa de transporte para servicios de distinto tipo. [4]

Principales ventajas de las redes OTN:

- **Reducción de los costes de transporte.** Al permitir el transporte de varios clientes en una única longitud de onda, posibilita un mayor aprovechamiento de estas, con el consecuente ahorro de costes reduciendo el número de transpondedores necesarios.

- **Uso eficiente del espectro óptico.** OTN facilita el uso eficiente de la capacidad DWDM. Su modo de funcionamiento permite completar la capacidad de las longitudes de onda de una manera más eficiente. Esta posibilidad se mantiene en toda la red gracias al uso de conmutadores OTN.
- **Individualidad.** OTN permite utilizar un ancho de banda específico y configurable para cada servicio o grupo de servicios. De esta manera es posible llevar a cabo un control total de su rendimiento (latencia, *jitter*, *throughput*, disponibilidad). Se pueden llegar a definir ciertas características de calidad de servicio para un determinado cliente y garantizar su cumplimiento.
- **Virtualización de operaciones de red.** OTN es capaz de dividir la red en redes privadas, también llamadas *Optical Virtual Private Networks* (O-VPN). OTN permite dotar a un determinado cliente de una serie de recursos dedicados de manera independiente al resto de la red, de forma que cada cliente solamente verá los recursos asociados a su red. Estas divisiones también permiten probar cambios en la red de una manera localizada, de modo que estos cambios no tendrán ningún impacto en el resto de la red.
- **Flexibilidad.** OTN permite a los operadores utilizar las tecnologías necesarias actualmente para el soporte de la red, a la vez que permite habilitar nuevas tecnologías e ir adaptándose a los nuevos requerimientos.
- **Seguridad.** Las redes OTN aseguran un alto nivel de seguridad y privacidad gracias a la posibilidad de dividir el tráfico en circuitos dedicados. Esta segregación del tráfico hace difícil interceptar los datos enviados entre los equipos a través de enlaces OTN canalizados. Al mantener a los usuarios separados y utilizar recursos dedicados es fácil impedir los accesos no autorizados de una red a otra.
- **Robustez.** La gestión de las redes OTN se lleva a cabo por un canal totalmente aislado de los datos de los usuarios. Esto hace que sea mucho más difícil acceder y modificar esta información accediendo a través de los puertos de interfaz de cliente.

Ninguna otra solución permite a los operadores la creación de servicios de transporte óptico de una manera más rápida y eficiente que ésta. Además elimina la incertidumbre acerca de los problemas que puede conllevar la mezcla del tráfico en el futuro.

En la actualidad OTN es la tecnología óptica más usada para encapsular las cargas útiles de alta capacidad requeridas por los equipos que forman las redes de conmutación de paquetes, tales como los conmutadores Ethernet y los *routers* IP.

OTN también es el único protocolo de transporte óptico que permite utilizar capacidades por encima de los 40 Gb/s. Actualmente ya soporta la implementación de señales con carga útil de hasta 200 Gb/s. Las estimaciones son que para el 2017 estén disponibles los 400 Gb/s y que sobre el 2020 sea capaz de soportar señales con una carga útil de 1Tb/s.

No debemos olvidar los beneficios para las redes troncales y metropolitanas obtenidos gracias a la posibilidad de implementar IP sobre OTN. Estas redes suponen una gran mejora respecto a las redes tradicionales basadas en WDM, aumentando su eficiencia y fiabilidad a un 99.999%, mejorando la gestión y supervisión de la red, aumentando la capacidad de protección de los servicios y reduciendo los costes.

Otra de sus ventajas fundamentales es que soporta *Forward Error Correction* (FEC) en la trama (estandarizado en la G.975 [18]). Esta cabecera añadida a la última parte de la trama ha demostrado su eficacia en la corrección de altas tasas de errores en la transmisión, producidos tanto por ruido como por otros tipos de distorsiones.

El FEC permite aumentar la distancia entre los repetidores ópticos, reduciendo tanto los costes de despliegue como de operación y simplificando (CAPEX y OPEX) la estructura de la red.

2.3.2.Arquitectura OTN

La estructura de la trama OTN se compone de distintos niveles que forman la jerarquía reflejada en la Figura 10 y que permiten la estandarización de la comunicación entre los distintos nodos de la red.

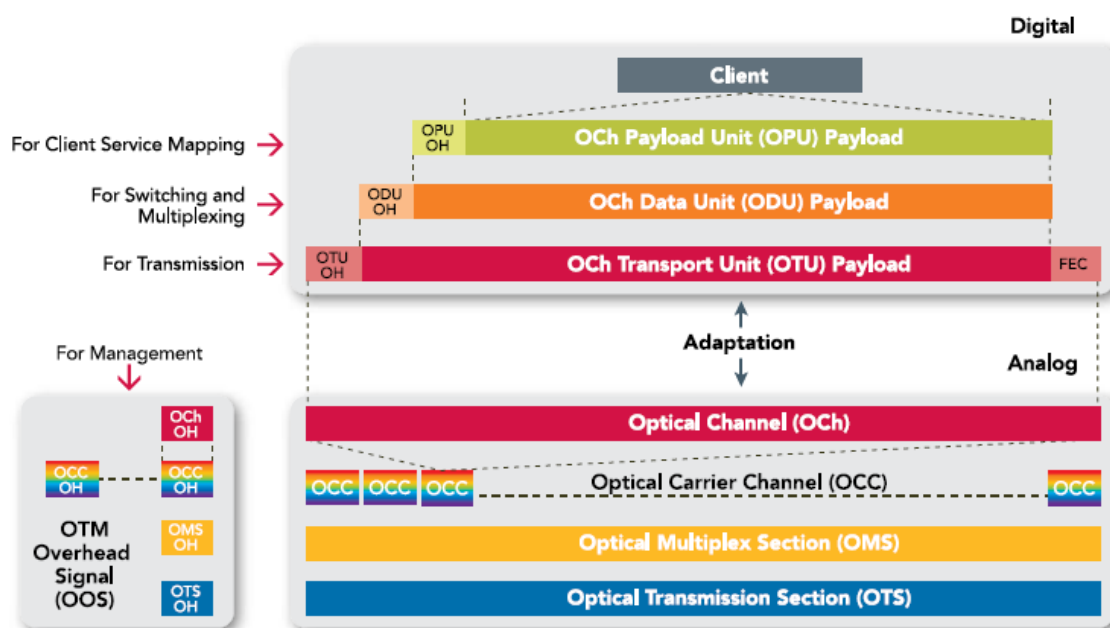


Figura 10: Optical Transport Module (OTM) [3]

El módulo de transporte óptico (OTM) es la estructura transportada a través de los interfaces ópticos de línea.

La unidad básica de la trama OTN es la Unidad de Carga Óptica (OPUk, *Optical Channel Payload Unit*). En ella se alojan las señales cliente que deben ajustarse a la tasa de la OPU. Para ayudar con la adaptación de las diferentes señales de cliente se añaden unos bits de cabecera, que dan soporte al mapeo de estas señales y dan información acerca del tipo de señal transmitida.

Una vez adaptada la señal se inserta en la Unidad de Datos Óptica (ODUk, *Optical channel Data Unit*) en la que se agregará las cabeceras necesarias para asegurar la supervisión extremo a extremo y la monitorización de determinadas secciones dentro de la red.

La Unidad de Transporte Óptica (OTUk, *Optical Transport Unit*) permite el transporte de una o más unidades de datos ópticas. Se forma tras añadirle una cabecera que la dota de funcionalidades, como la monitorización del rendimiento, la detección de fallos FEC, el soporte de las protecciones o la comunicación del plano de control.

La capa física transforma la OTU en una señal óptica en una determinada longitud de onda, creando el Canal Óptico (OCh, *Optical Channel*) que se transporta a través de la línea óptica.

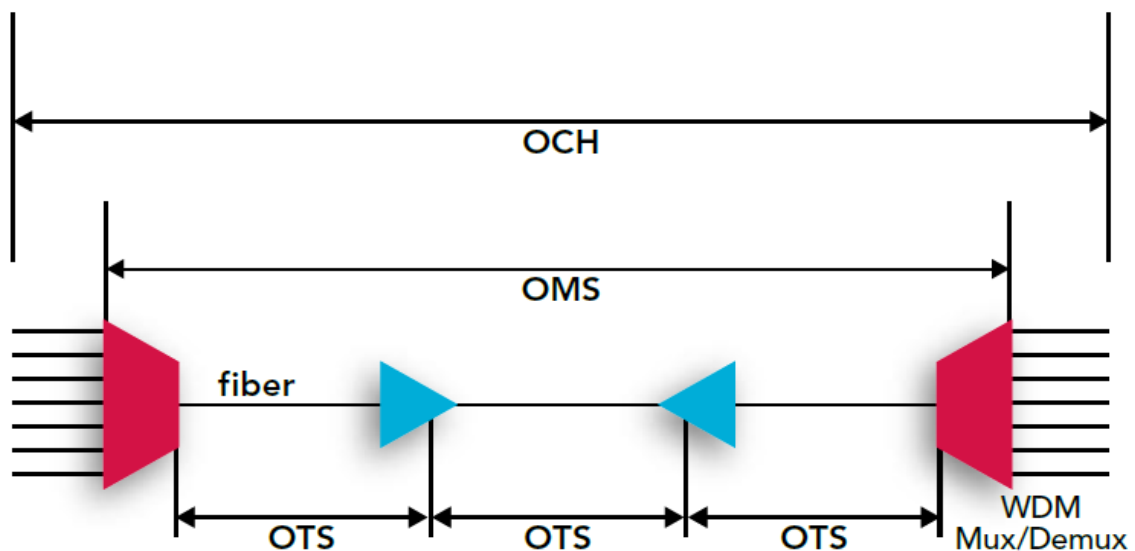


Figura 11: Estructura de línea OTN. [3]

El canal óptico es una conexión óptica entre dos usuarios y ocupa todo el camino óptico. Los canales ópticos son multiplexados y transmitidos como señales ópticas a través de una única fibra. Dentro de este camino óptico se puede diferenciar dos tramos:

- Sección de Multiplexación Óptica (OMS, *Optical Multiplex Section*), es el tramo existente entre dos equipos que pueden multiplexar o demultiplexar longitudes de onda en una fibra.
- Sección de Transmisión Óptica (OTS, *Optical Transmission Section*), se refiere al tramo entre dos puntos de amplificación.

2.3.3.Capacidades de las tramas OTN

La tasa de OTN puede ser igual o superior a la tasa de la señal de cliente. Existen dos tipos de asignaciones en una Unidad de Datos Óptica:

- **Asignación transparente.** En la asignación de datos transparente se asigna la carga útil del cliente de manera completa a una única ODU, de manera que la tasa OTN debe ser más alta que la del cliente.
- **Asignación no transparente.** En la asignación de datos no transparente se elimina parte de la carga del cliente para conservar la capacidad de la red. Utilizando esta estrategia se podrán asignar más ODU's a una OTU.

En la Figura 12 aparecen algunas de las velocidades de línea estandarizadas en la norma G.709 para las OTUs, ODUs y OPUs. Como se ha comentado anteriormente, la ITU está trabajando en el desarrollo de tasas adicionales que trabajen a mayor velocidad:

OTU type	OTU nominal bit rate	OTU bit rate tolerance
OTU1	255/238 × 2 488 320 kbit/s	±20 ppm
OTU2	255/237 × 9 953 280 kbit/s	
OTU3	255/236 × 39 813 120 kbit/s	
NOTE – The nominal OTUk rates are approximately: 2 666 057.143 kbit/s (OTU1), 10 709 225.316 kbit/s (OTU2) and 43 018 413.559 kbit/s (OTU3).		

ODU type	ODU nominal bit rate	ODU bit rate tolerance
ODU1	239/238 × 2 488 320 kbit/s	±20 ppm
ODU2	239/237 × 9 953 280 kbit/s	
ODU3	239/236 × 39 813 120 kbit/s	
NOTE – The nominal ODUk rates are approximately: 2 498 775.126 kbit/s (ODU1), 10 037 273.924 kbit/s (ODU2) and 40 319 218.983 kbit/s (ODU3).		

OPU type	OPU Payload nominal bit rate	OPU Payload bit rate tolerance
OPU1	2 488 320 kbit/s	±20 ppm
OPU2	238/237 × 9 953 280 kbit/s	
OPU3	238/236 × 39 813 120 kbit/s	
NOTE – The nominal OPUk Payload rates are approximately: 2 488 320.000 kbit/s (OPU1 Payload), 9 995 276.962 kbit/s (OPU2 Payload) and 40 150 519.322 kbit/s (OPU3 Payload).		

Figura 12: Tipos y capacidad de OTU, ODU y OPU (a, b y c). [5]

2.3.4.Jerarquia de Multiplexación OTN

OTN soporta la multiplexación en contenedores de mayor capacidad a nivel de ODU. Como se puede ver en la Figura 13, dependiendo de la tasa de la señal cliente y de la capacidad de línea de la red, se pueden llevar a cabo distintas encapsulaciones.

Existen dos tipos de agregaciones para OTN:

- **Low Order (LO).** LO se usa cuando la señal cliente no necesita una mayor agregación dentro de la longitud de onda
- **High Order (HO).** HO se usa cuando es necesaria la agrupación y/o multiplexación de sub-lambdas.

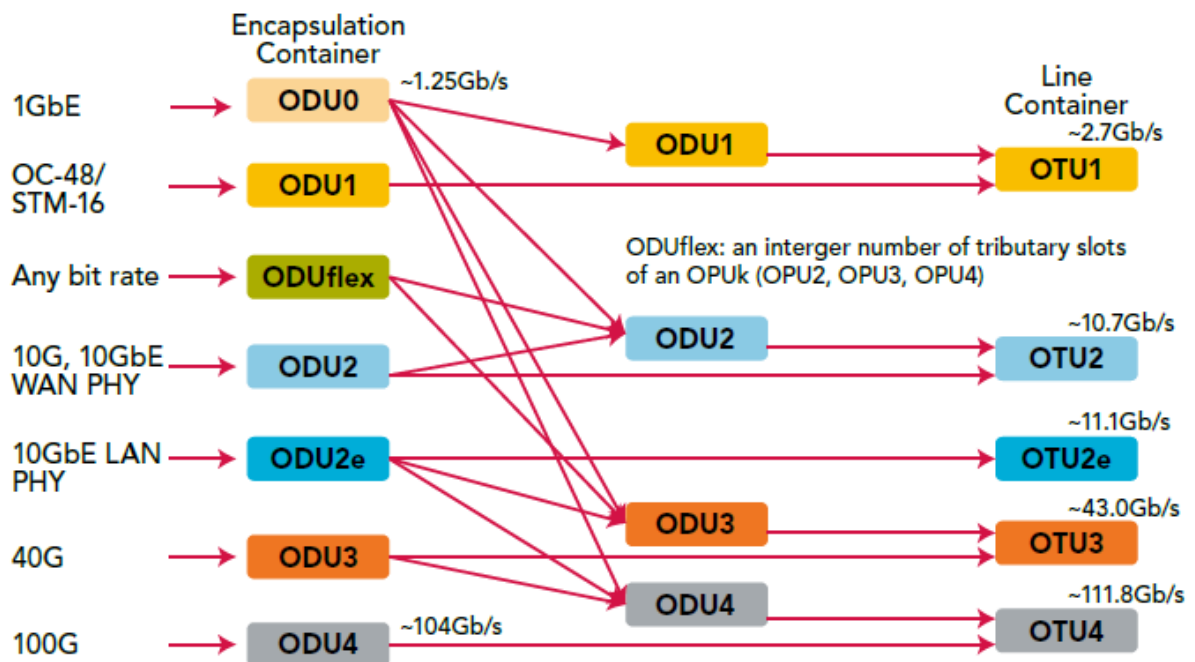


Figura 13: Jerarquía OTN [3]

Por ejemplo, cuatro ODU1s se pueden multiplexar en una OPU2, y un OPU3 puede estar formado por cuatro ODU2s, 16 ODU1s o una combinación de ODU1s y ODU2s.

2.3.5. Interfaces definidos para OTN

La recomendación UIT-T G.872 [15] define dos clases de interfaces para las redes OTN:

Inter-domain Interfaces (IrDI), conecta principalmente equipos de diferentes fabricantes en dos dominios

Intra-domain interfaces (IaDI), conecta principalmente equipos del mismo fabricante en el mismo dominio. Los equipos pueden estar conectados usando las especificaciones definidas por el fabricante.

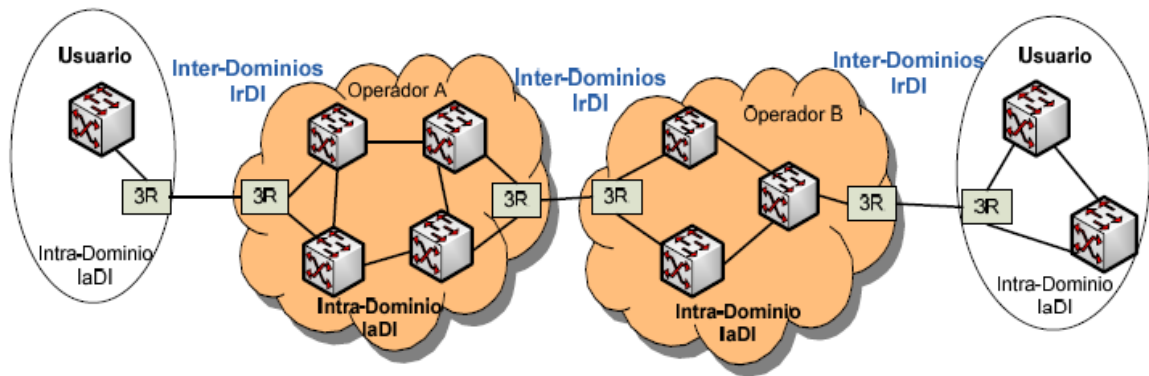


Figura 14: Interfaces de una red OTN [5]

2.4. Redes WDM malladas con plano de control

Los usuarios de redes WDM se comenzaron a encontrar con nuevas necesidades que las redes tradicionales no podían cubrir:

- Las necesidades de ancho de banda han crecido de manera exponencial debido a los nuevos servicios que deben soportar.
- Los procedimientos para ampliar una red WDM tradicional, así como los procedimientos para mantenerla son largos y costosos, lo que desemboca en una respuesta lenta ante nuevas necesidades y ante eventualidades que puedan aparecer en la red.
- Las protecciones en las redes tradicionales tienen poca diversidad y son poco eficientes, lo que desemboca en el uso ineficiente del ancho de banda de la red (una parte importante debe estar destinado a la protección del servicio) y en una falta de robustez ante problemas en la red.

Como respuesta a estos problemas se desarrollaron las redes ASON (*Automatically Switched Optical Network*) cuyas características principales son:

- **Descubrimiento automático de recursos.** Se obtiene una imagen precisa de la topología de red y de la disponibilidad de recursos, lo que permite el aprovisionamiento automático de servicios y la restauración automática de los mismos en caso de fallo.
- **Introduce la utilización del concepto calidad de servicio.** Las redes ASON son capaces de proporcionar distintas calidades de servicio a distintos clientes, lo que permite la creación de servicios con un SLA (*Service Level Agreement*) específico basándose en la utilización de distintos niveles de protección.
- **Configuración de servicios extremo a extremo.** Para configurar un servicio en estas redes solo se debe especificar el origen, el destino, el ancho de

banda y los requisitos de protección. El sistema es capaz de establecer el servicio de manera automática.

Los principales elementos de una red WDM mallada con plano de control son los interfaces ópticos y los multiplexores ópticos que se explicarán a continuación.

2.4.1. Interfaces ópticos

El ritmo de crecimiento de las necesidades de tráfico en las redes de transporte actuales está superando ampliamente su capacidad, basada tradicionalmente en servicios de 2.5G a 10G.

Son varios los factores que hacen estas necesidades hayan crecido mucho en los últimos años y que lo sigan haciendo en el futuro. Por un lado se encuentra el auge del consumo de vídeo a través de redes fijas y móviles. Se calcula que el tráfico de internet crecerá entre un 40 y un 50 por ciento en los próximos años, y de este, dos tercios incluirán algún tipo de vídeo. Por otro lado se encuentran las aplicaciones basadas en la nube y sus grandes necesidades de capacidad, así como los servicios bajo demanda en los que el cliente cada día demanda vivir experiencias de más alta calidad.

Los proveedores de servicios están intentando encontrar una fórmula para aumentar las capacidades de sus redes de una manera fiable y rentable. El aumento de las necesidades de ancho de banda no ha venido acompañado de un crecimiento proporcional de los ingresos de los operadores, por lo que en lugar de apoyar nuevas soluciones se está buscando optimizar las ya existentes.

El aumento de las velocidades de transmisión ha venido de la mano de nuevos métodos de codificación y modulación, y de la aparición de evoluciones tecnológicas como la detección coherente.

El incremento de 2.5 a 10Gb/s se pudo llevar a cabo gracias a la evolución de la modulación directa a la modulación externa. Para ambas velocidades se utilizaba la misma modulación, OOK (*On/Off Keying*). Aunque este tipo de modulación se ha usado ampliamente, no es muy eficiente en cuanto a la utilización del espectro, y es muy susceptible al PMD y los efectos no lineales a velocidades mayores de 10Gb/s.

Inicialmente, el incremento de 10G a 40G se basó en la evolución de la modulación OOK (*On/Off Keying*) hacia modulaciones más complejas como la BPSK o QPSK. Esta primera implementación no tuvo mucho éxito, principalmente porque el alcance máximo no era suficiente para cumplir los requisitos de las redes de larga distancia. El adelanto tecnológico que realmente permitió romper la barrera de los 10G fue la introducción de tecnologías ópticas coherentes, primero para los sistemas de 40Gb/s y después para los sistemas de 100Gb/s, que eran capaces de compensar PMD y atenuar el impacto de los efectos no lineales.

Por su parte, el incremento de 40G a 100G vino de la mano de la introducción de la tecnología de multiplexación en polarización basada en el uso de DSPs, en la que los conversores analógico/digital (ADCs) trabajan a una tasa mayor de 28 GBaud.

En el futuro cercano, un mayor incremento de la capacidad vendrá de la mano de la introducción del modulación OFDM óptica, que permitirá la transmisión coherente de múltiples portadoras simultáneamente, elevando la capacidad hasta rangos más allá de los 400 Gb/s.

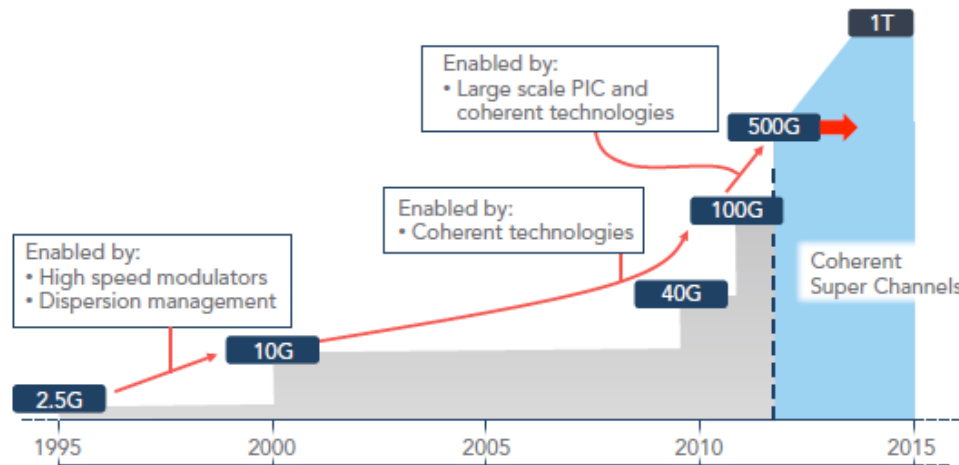


Figura 15: Avances en la tecnología DWDM[6]

2.4.1.1. Modulación directa y modulación externa

Para llevar a cabo la modulación de la señal transmitida con la información que se desea propagar, generalmente se emplea un diodo láser de semiconductor como fuente de luz, la cual puede salir modulada directamente del láser o pasar por una etapa de modulación externa a la fuente. Basándonos en esta diferencia, existen básicamente dos grandes grupos de tecnologías de modulación óptica: la generación de la portadora óptica con láseres modulados directamente (modulación directa) o mediante dispositivos externos al láser que modulen la luz radiada por los mismos antes de su acoplamiento a la fibra (modulación externa).

La modulación directa es la manera más fácil de combinar la información digital de la fuente sobre la portadora óptica. Los datos que se desean transmitir modulan la corriente de conducción del láser, y a través de ella se consigue generar una modulación de intensidad, fase o frecuencia.

La generación de una modulación directa de intensidad (*Intensity Modulation*, IM), se basa en generar una corriente eléctrica que alimente al láser sincronizada con los datos digitales. Los bits “1” encienden el láser mientras que los bits “0” están asociados con un valor de la corriente por debajo de la corriente umbral, y no emitirán potencia óptica. Esta implementación sólo permite el uso de la modulación OOK (*On/Off Keying*).

La modulación externa consiste en un diodo láser que genera una potencia óptica constante en el tiempo (láser de onda continua) que posteriormente pasa por un dispositivo óptico externo al que se le hace llegar la señal moduladora. A la salida, la radiación estará modulada con la forma deseada y se acoplará a la fibra. Los

moduladores más utilizados son los moduladores basados en interferómetros de Mach-Zehnder (MZM) y en materiales electroópticos.

Las ventajas de la modulación externa respecto a la modulación directa son: una mayor linealidad, un mayor ancho de banda y la eliminación completa del fenómeno chirp. Este fenómeno es una distorsión de fase residual en señales OOK que se origina por la dependencia entre el índice de refracción del material semiconductor y la densidad de los electrones.

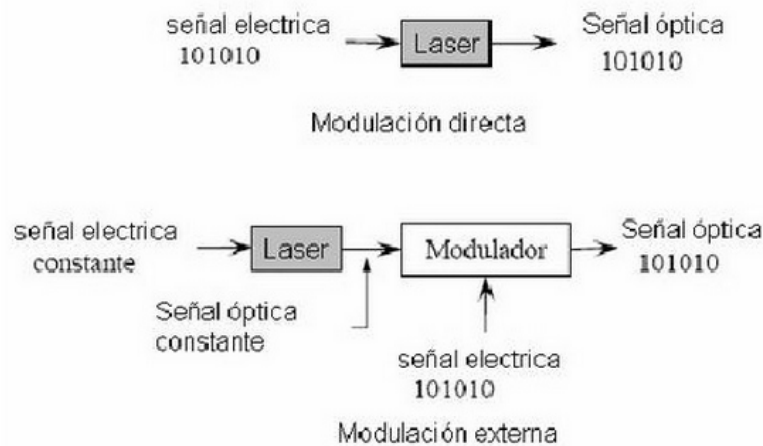


Figura 16: Modulación directa y externa [7]

2.4.1.2. Modulación por desplazamiento de fase

Para superar los problemas de baja eficiencia y la susceptibilidad al PMD y a los efectos no lineales que aparecían para velocidades superiores a 10Gb/s, se comenzaron a usar otros métodos de modulación y se optó por la modulación por desplazamiento de fase.

La modulación por desplazamiento de fase o *Phase Shift Keying* (PSK) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. Es una modulación de fase donde la señal moduladora es digital.

Existen diferentes formatos de modulación PSK dependiendo del número de posibles fases que puede tomar: Modulación por desplazamiento de fase binaria o *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) con 2 fases, Modulación por desplazamiento de fase cuaternario o *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) con 4 fases que son las actualmente usadas en redes ópticas.

A mayor número de posibles fases, mayor es la cantidad de información que se puede transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero mayor es también su sensibilidad frente a ruido e interferencias.

Un ejemplo simple de modulación por fase sería el mostrado en la Figura 17. En él, se utiliza un modulador *Mach Zehnder Modulator* (MZM) para codificar un flujo de datos en una portadora óptica. Dependiendo de los detalles exactos de la implementación se conocerá como PSK (*Phase Shift Keying*), BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) o si los datos son codificados con cambios de fase, DPSK (*Differential Phase Shift Keying*).

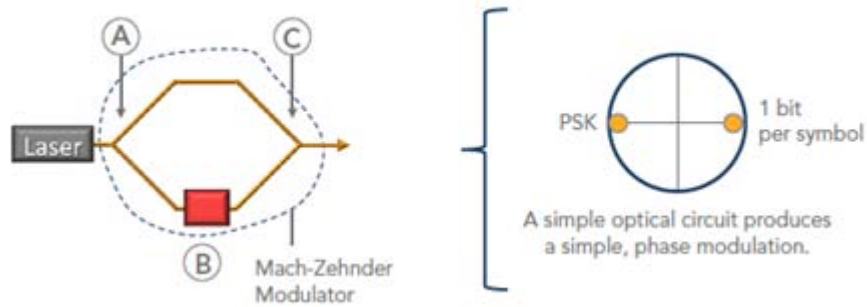


Figura 17: Modulador Mach Zehnder y la modulación de fase resultante [6].

La señal del laser que entra en el MZM por el punto A es dividida en dos, una que pasa por la rama superior y otra por la rama inferior de la guía de onda. En el punto B se aplicará una señal a la guía de onda que modifica el índice de refracción y por tanto la velocidad de propagación de la luz en esa rama. Cuando las dos partes se combinan de nuevo en el punto C, nos encontraremos con una serie de cambios de fase codificados en la luz que están directamente relacionados con la señal de entrada.

En el lado derecho de la figura es una representación de una modulación PSK genérica. Si un símbolo aparece en el lado izquierdo el receptor lo interpretará como un “1”, si aparece en el lado derecho, lo interpretará como un “0”.

Un ejemplo con un transmisor óptico más complejo sería el de la Figura 18. En él, aparece una serie de moduladores MZM anidados, recibe el nombre de Super Mach-Zender. El funcionamiento será el mismo que el que se ha explicado en la figura anterior, la señal se enviará por la parte superior e inferior de la guía de onda, y los bloques rojos representan un punto de entrada de una parte de la señal de modulación. El MZM superior forma la llamada señal en fase, y el MZM inferior tras pasar por un módulo de desplazamiento de fase de 90 grados, forma la señal de cuadratura de la modulación QPSK.

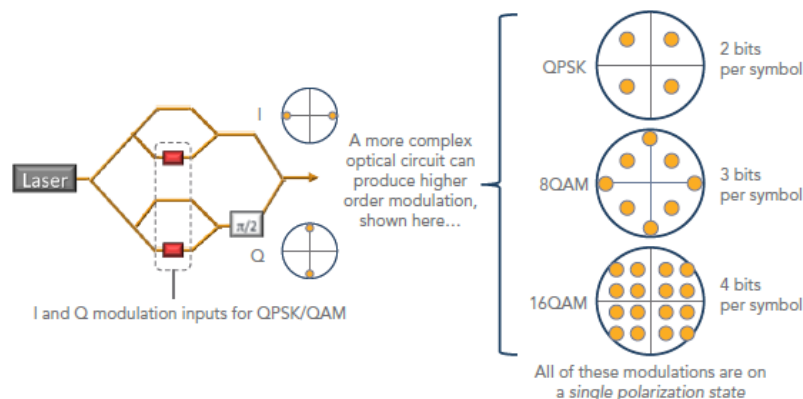


Figura 18: Modulación de High Order usando un modulador Super Mach-Zender [6].

Usando el mismo circuito óptico se puede conseguir modulaciones de mayor orden: 8QAM, 16QAM.

Las modulaciones BPSK y QPSK son las más adecuadas en redes ópticas desde el punto de vista de protección frente a errores. Para estas modulaciones la diferencia entre distintos símbolos asociados a cada fase es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. No pasa lo mismo con otras variantes tales como la PSK de 8 niveles (8-PSK) o superiores, para las que existen otros esquemas de modulación digital más eficientes.

Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK). Son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico habiendo una diferencia de 180° entre ellas. Es la que representa mayor inmunidad frente al ruido, ya que la diferencia entre símbolos es máxima.

Modulación por desplazamiento de fase cuaternario (QPSK). Son posibles cuatro fases de salidas diferentes para una sola frecuencia de la portadora. La asignación de bits a cada símbolo suele hacerse mediante el código Gray, consistente en que entre dos símbolos adyacentes los símbolos solo se diferencian en 1 bit, con lo que se logra minimizar la tasa de bits erróneos.

Aunque la modulación de fase tiene ventajas claras también tiene un gran desventaja, y es que este tipo de modulación da como resultado una señal más compleja en la medida en que hay múltiples estados de la señal que tienen que ser recuperados por el receptor, lo que complica extraordinariamente el diseño el emisor y el receptor.

2.4.1.3. Detección Coherente.

El receptor mezcla la señal recibida con un oscilador local, que es un laser de potencia constante que funciona a la misma frecuencia y fase que la señal portadora. Al mezclarse con la señal óptica recibida sólo se amplifica la señal óptica de la misma frecuencia mientras las otras desaparecen ya que no son coherentes con el oscilador. Por lo tanto, permite recuperar la información de frecuencia, fase, y amplitud de la señal transmitida con unos requerimientos de OSNR (*Optical Signal Noise Ratio*) bajos.

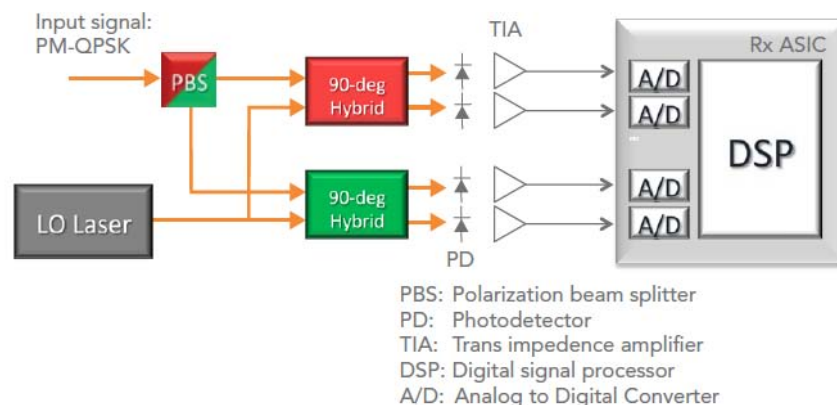


Figura 19: Receptor Coherente [6].

En la Figura 19 se muestra un diagrama de bloques de un receptor coherente actual. La señal óptica entrante pasa a través de un divisor de haz de polarización (*Polarization*

beam Splitter, PBS), que divide la señal en dos señales de polarización ortogonal, la componente de polarización X y la componente de polarización Y.

Cada componente pasa a un circuito óptico híbrido de 90 grados, cada circuito consiste en acopladores ópticos unidos dos a dos con un retardo de fase de 90 grados implementado en uno de los brazos del acoplador. Este circuito permite que los componentes de fase I y Q de la señal sean extraídos como resultado de las interferencias generadas por el oscilador local. Esta extracción es la esencia de la detección coherente.

Las señales pasarán de óptico a eléctrico usando una serie de fotodetectores balanceados. Estas señales están formada por tres elementos: ruido, potencia del oscilador local y señal coherente.

Las señales eléctricas de banda base son digitalizadas por cuatro conversores digitales (ADC) de alta velocidad y las señales digitales resultantes se pasan a un potente procesador de señal digital (DSP).

La potencia que se deberá utilizar para el oscilador local dependerá del fotodetector utilizado. Si se usó un único fotodetector, será necesario emplear un láser oscilador local con 20-25dB más de potencia que la señal de entrada para la señal coherente prevalezca. Si se usa un fotodetector equilibrado, se puede usar un oscilador local menos potente.

La fase y frecuencia del oscilador local no tienen que ser controladas activamente. De hecho, la frecuencia sólo necesita estar en un rango de 1 GHz de la señal entrante, y la velocidad de ajuste de frecuencia puede ser relativamente baja. Para recuperar los bits transmitidos se realiza la sincronización de fase de la portadora en el DSP (*Digital Signal Processor*). A este modo de detección coherente se le conoce como Detección Coherente Intradyne.

Además de un gran aumento en la sensibilidad del receptor, un receptor coherente se puede sintonizar para que reciba una λ específica, consiguiendo así un alto nivel de rechazo de los canales DWDM vecinos. En los sistemas basados en rejilla fija no será una ventaja muy importante, pero en los basados en rejilla flexible que se verán más adelante será una característica imprescindible.

2.4.1.4. Multiplexación por división de polarización

Para aumentar aún más la eficiencia espectral de las redes ópticas se utiliza la técnica conocida como Multiplexación por División en Polarización (*Polarization Division Multiplexing*, PDM) o Polarización Dual (*Dual Polarization*, DP). Esta técnica, aprovecha el hecho de que la fibra puede ser considerada como una guía de ondas circular y como tal soporta dos polarizaciones ortogonales, duplicando la capacidad del canal.

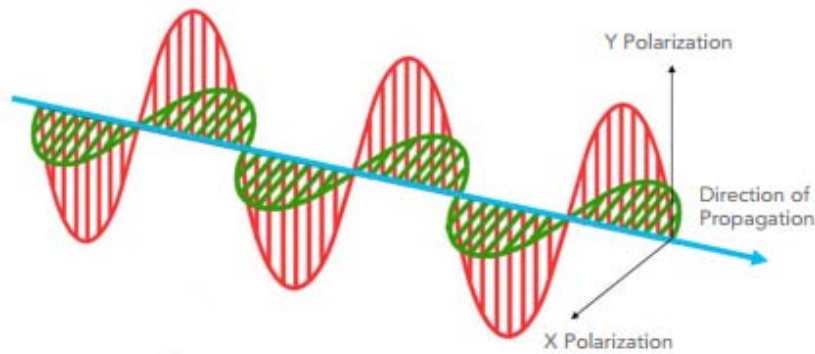


Figura 20: Polarización de la onda electromagnética [6].

Con esta técnica se duplica la eficiencia espectral de un formato de modulación dado, usando el mismo receptor: PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8PSK y PM-16QAM ofrecen respectivamente dos, cuatro, seis, ocho bits por símbolo. En este caso un símbolo es una combinación de estados de amplitud/fase y polarización, por lo que reciben el nombre de “*dual-pol symbol*”, símbolos de polarización dual.

En la Figura 20 se muestra el esquema del transmisor necesario para generar una señal de 100Gb/s con modulación PM-QPSK. La luz de un único láser se divide y se envía a 4 moduladores MZM diferentes. Cada una de las parejas de moduladores MZM generan una señal QPSK y estas señales son enviadas a un combinador de polarización de forma que la señal superior se convierte en X-polarizada mientras que la señal de la parte baja se convierte en Y-polarizada. La tasa de bits de todo el transmisor PM-QPSK es cuatro veces la tasa de símbolo de cada modulador MZM.

En la parte derecha se muestra la señal 100G PM-QPSK resultante. Se han representado en color verde y rojo los dos distintos estados de polarización, aunque son realmente la misma longitud de onda.

Con este tipo de modulación una señal de 100 Gb/s ocupará aproximadamente 38GHz del espectro.

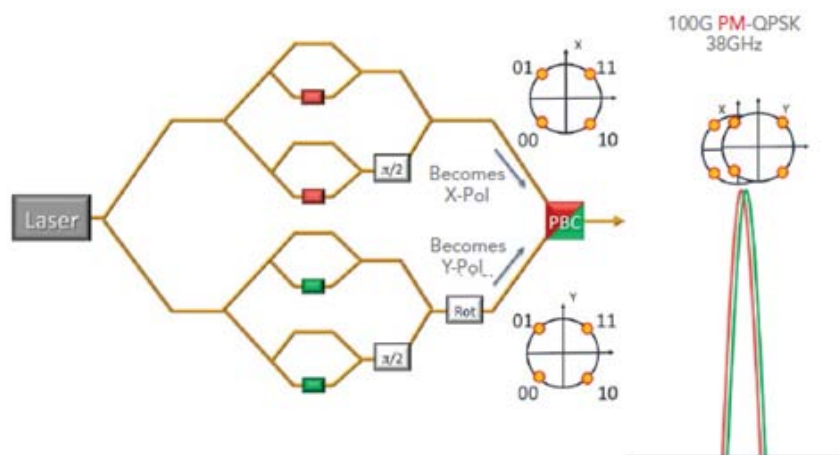


Figura 21: Esquema de 100Gb/s, única portadora, transmisor PM-QPSK [6].

La Figura 22 muestra una la implementación de transmisión a 100Gb/s más popular. Es una implementación con portadora dual, en la que dos flujos de datos de 50Gb/s de portadora única se transmiten en un canal de 50GHz DWDM. Tiene la misma eficiencia espectral que la implementación de portadora única y prácticamente el mismo alcance óptico, la principal ventaja de los portadores duales es que opera a 14G Baudios más cabeceras, en comparación con los sistemas de una única portadora que trabajan a 28G Baudios más cabeceras.

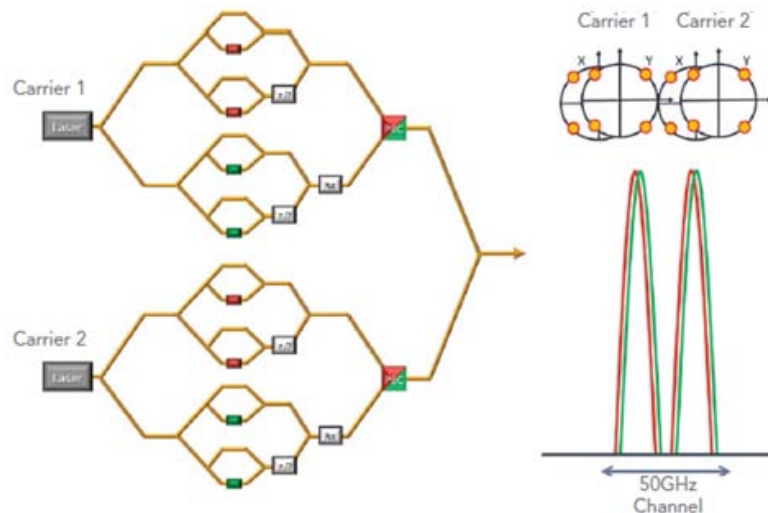


Figura 22: Esquema de 100Gb/s, portadora dual, transmisor PM-QPSK [6].

Combinando el uso de la modulación de fase con la polarización dual se puede llegar a conseguir un alto grado de calidad y rendimiento en las transmisiones de alta velocidad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta solución requiere un tipo de receptor distinto al usado en la transmisión óptica convencional.

2.4.1.5. Tecnologías coherentes

Las dos principales ventajas que han hecho de las tecnologías coherentes una opción interesante para los fabricantes respecto a las ya existentes son: la mayor eficiencia espectral conseguida gracias a las modulaciones de mayor orden usadas, y el potente procesamiento de las señales digitales que mejoran los problemas de dispersión cromática y PMD.

El desarrollo de las tecnologías coherentes ha sido un gran logro técnico, permitiendo un incremento de 5 veces la capacidad de la fibra en comparación con las tecnologías IM-DD (8 Tb/s contra 1.6Tb/s en la banda C). Sin embargo, debido a su complejidad sólo una parte de los fabricantes han sido capaces de llegar a una solución práctica y fiable, y normalmente han desarrollado sus propios algoritmos coherentes.

Aunque no hay una definición estándar sobre los fundamentos de la detección coherente en DWDM, sí que hay ciertos requisitos en los que todas las implementaciones coinciden: modulación por desplazamiento de fase, multiplexación por polarización, detección coherente, utilización de procesadores de señal digital y conversores de analógico a digital.

- **Modulación por desplazamiento de fase.** Este tipo de modulación representa una mejora significativa respecto a los valores de OSNR de las modulaciones tradicionales. Gracias a la codificación de un mayor número de cambios de fase en la portadora, aumenta el número de bits transportados en cada símbolo y la sensibilidad a las degradaciones de la fibra relacionadas con la velocidad del símbolo.
- **Multiplexación por polarización.** Aprovecha las polarizaciones ortogonales de la fibra para duplicar la capacidad del canal. Como hemos explicado necesita de receptores distintos a los convencionales.
- **Detección Coherente.** Permite recuperar la información de frecuencia, fase, y amplitud de la señal transmitida con unos requerimientos de OSNR bajos.
- **Digital Signal Processor (DSP).** Representan la gran diferencia entre las implementaciones comerciales de las soluciones DWDM coherentes. Realizan el procesamiento de la señal óptica recibida y sus principales funcionalidades son:

Compensación de la dispersión cromática. Los módulos DSP puede compensar prácticamente cualquier valor de CD que se puede encontrar en las fibras ópticas. Esto permite quitar las fibras de compensación de dispersión (dispersion compensating fiber (DCF)) de las rutas que usen detección coherente. De hecho, los sistemas coherentes funcionan mejor en enlaces que no los tienen.

Compensación de dispersión por modo de polarización. Tras la dispersión cromática, el DSP realiza la compensación de la dispersión por modo de polarización. Un algoritmo DSP de alta calidad puede compensar incluso valores de PMD más altos que los existentes en las fibras actuales.

Recuperación de la portadora “Intradyné”. En la detección coherente óptica moderna, la manera usada para mezclar la señal es conocida como detección *intradyné*, en la que se usa un oscilador local en *free-running*. La recuperación de la portadora entre la señal recibida y el oscilador local se lleva a cabo digitalmente en el DSP. La frecuencia de desplazamiento y el ruido de fase serán rastreados por el recuperador de la señal digital en el DSP.

2.4.2. Multiplexores ópticos reconfigurables de extracción-inserción (ROADM)

Uno de los componentes más importantes a la hora de implementar redes malladas con plano de control son los multiplexores ópticos reconfigurables de extracción- inserción (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*, ROADM). Estos nodos son los encargados de conmutar el tráfico entre las distintas vías disponibles y de encaminar el tráfico local.

La necesidad de una mayor flexibilidad de ancho de banda, de una mayor eficiencia operativa y los avances tecnológicos han marcado la evolución de los elementos de las redes WDM. En el caso de los multiplexores ópticos de extracción- inserción (*Optical*

Add/Drop Multiplexer, OADM), se ha pasado de los Multiplexores Ópticos Fijos de Extracción-Inserción (*Fixed Optical Add/Drop Multiplexer*, FOADM), que realizan la inserción/extracción de *lambdas* usando filtros no reconfigurables vía software, a los ROADMs (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) que permiten la extracción/inserción de *lambdas* permitiendo su configuración de manera remota.

Son varias las ventajas que aporta el uso de ROADMs en una red. Por un lado, al ser reconfigurables, permiten que cada *lambda* siga un camino individual, de manera que las redes puedan crecer de forma independiente sin que haga falta un conocimiento perfecto de las necesidades de tráfico futuras. Por otro lado, al permitir que las *lambdas* eviten algunos nodos, minimizan el número de regeneradores necesarios en la red. Tampoco debemos olvidar la reducción de los gastos operacionales, puesto que permiten modificar un circuito de manera remota sin necesidad de presencia física en el emplazamiento.

Todas estas mejoras en la eficiencia, han llevado a la implementación a gran escala de ROADMs en redes metropolitanas, regionales y de larga distancia.

2.4.2.1. Características de un ROADM

A la hora de establecer cuáles son los requisitos de un nodo ROADM el principal factor a evaluar son las necesidades del operador y su presupuesto, el despliegue de ROADMs es una solución de compromiso entre la flexibilidad que aportan a la red y el precio de la solución.

Las necesidades de un gran operador que debe conectar millones de clientes en miles puntos de agregación distintos, no son las mismas que las de una pequeña red con unas pocas localizaciones. Mientras que el primero necesitará una red grande, flexible, jerárquica y heterogénea, en la que se van a tener que llevar a cabo un gran número de operaciones de gestión para satisfacer las necesidades de todos los clientes. El segundo, seguramente, estará más preocupado en minimizar el número de recursos necesarios para llevar a cabo la comunicación.

A continuación se describen las características a tener en cuenta a la hora de diseñar un nodo ROADM así como sus distintas opciones:

- **Conectividad.** La función básica de un nodo ROADM es la de interconectar todos los pares de fibra de las vías de línea del nodo con las vías locales, para añadir/extraer tráfico donde están conectados los transpondedores. Un ROADM completo es aquel que proporciona adición/extracción de cualquier combinación de *lambdas* sin ninguna restricción. Un ROADM parcial es aquel que sólo tiene acceso a un conjunto del total de *lambdas* o en el que la selección de la primera *lambda* de alguna manera limita el resto de *lambdas* que pueden ser tratadas. La opción ideal es la conectividad total, pero necesita de aplicaciones de alto coste.
- **Operaciones sin impacto.** Los cambios de configuración en los ROADMs no deben perturbar las longitudes de onda ya existentes. Es posible construir un ROADM que no tenga impacto, combinando el núcleo del ROADM, en el que se llevan a cabo las funciones de conmutación propiamente dichas, con elementos que bloqueen la longitud de onda antes de esta conmutación.

- **Separación de las direcciones.** Un elemento de red es direccionalmente separable si no existen ningún punto único de fallo (*single point of failure*; SPOF) que pueda provocar la pérdida de inserción /extracción del servicio en más de uno de sus puertos de línea. Por un lado, asegura que los caminos principal y de protección de un circuito protegido no fallarán a la vez, con lo que la probabilidad de que el tráfico se vea afectado será menor. Por otro, se podrán reparar las partes con problemas, sin afectar a los caminos de protección.
- **Alivio de la ruta.** En redes de alta capacidad es deseable poder sobredimensionar rutas congestionadas, es decir, poder usar más de un par de fibras entre los nodos que soporten un gran volumen de tráfico. En estas redes es recomendable el uso de ROADMs grado alto para poder reforzar la capacidad en los enlaces que así lo requieran.
- **Número de ROADMs en cascada.** Un parámetro clave en el diseño de redes con enrutamiento por longitud de onda es el número de ROADMs por el que esta debe pasar para seguir un camino determinado. El paso por un ROADM necesariamente implica deterioro en la señal transmitida, degradación de la relación señal a ruido debido a las pérdidas, distorsión debido al estrechamiento del espectro de la señal y pérdidas por PMD. Al diseñar un módulo ROADM, teniendo en cuenta el número máximo de nodos en cascada que debe atravesar la señal, se debe intentar encontrar el equilibrio entre el coste de la mejora de su rendimiento, y el coste del uso de regeneración adicional.
- **Acondicionamiento del canal.** Los ROADMs pueden actuar como ecualizadores de la señal, ya que pueden atenuar los canales de forma individual. Esta ecualización es especialmente útil en redes en las que no todas las señales siguen el mismo camino, o en aquellos sistemas de larga distancia que tienen que corregir pérdidas acumuladas.
- **Escalabilidad.** Una arquitectura de nodos ROADM escalable permite a un nodo crecer de manera progresiva y, por tanto, el costo de la red puede ser repartido en el tiempo, no teniendo que determinarse su tamaño desde un principio. También permite que la misma arquitectura básica pueda ser usada tanto en ROADMs pequeños como grandes. Por último, en el caso de redes que soportan gran cantidad de tráfico, permiten su sobredimensionamiento, aliviando la presión en estos tramos y eliminando cuellos de botella.
- **100% de capacidad de inserción /extracción.** Un ROADM tiene una capacidad del 100% si todas las longitudes de onda de todos los grados pueden ser insertadas/extraídas en un nodo. Lo ideal en este caso es que un nodo pueda aumentar su capacidad de inserción/extracción según sea necesario.

Todas las características explicadas hasta ahora ya están disponibles y han sido desplegadas en las redes de hoy en día. Las siguientes son más recientes. Algunas ya están siendo desplegadas mientras que otras siguen siendo sólo proyectos.

- **Puertos de adición/extracción no coloreados y sin dirección.** Uno de los requisitos más importantes de una red dinámica es que los recursos puedan ser

compartidos, ya que en caso contrario, los costes de los transpondedores la convertirían en una red económicamente no viable. Cualquier transpondedor sin usar deber ser capaz de servir para responder a cualquier demanda de tráfico, por lo tanto es ideal que sea no coloreado y sin dirección.

- **Flexibilidad espectral.** Las redes de multiplexación por división de longitud de onda utilizan una rejilla estandarizada, que produce canales de longitud de onda con el mismo espaciado (50GHz es el valor típico). Esta evolución ha traído cambios para el núcleo de conmutación, la sección de extracción/inserción del nodo y los transpondedores, el software de gestión de la red, los protocolos de enrutamiento, las herramientas de planificación, etc. Para unos, la motivación de esta mejora es la de soportar canales con velocidades más altas, mientras que para otros es la mejora de la eficiencia al poderse usar tasas de transmisión mixtas dentro de una misma red.
- **Transpondedores flexibles.** En los últimos años se han desarrollado transpondedores definidos por software. En algunos se pueden definir los protocolos de cliente, de manera que pueden soportar FibreChannel, SONET o interfaces de cliente GbE. Otros pueden ajustar el formato de modulación y/o la tasa de símbolo empleado en el lado línea, y de ese modo optimizar la eficiencia espectral.
- **Velocidad de conmutación.** El tiempo de conmutación requerido para un ROADM depende directamente de la tecnología en la que se base la conmutación óptica. La principal aplicación de las redes fotónicas es el aprovisionamiento de circuitos, un proceso que históricamente necesitaba de días o incluso semanas para completarse, por lo que un tiempo de conmutación de segundos o incluso minutos es aceptable. Se están realizando estudios con servicios de ancho de banda dinámico, en los que un cliente pueda conseguir ancho de banda adicional según lo requiera en cada momento. Aunque estos servicios serán mucho más exigentes con la velocidad de conmutación de los ROADM's, no es este el principal obstáculo que se están encontrando. Las limitaciones vienen del software principalmente, la gestión de la red y de problemas operacionales.

2.4.2.2. Wavelength Selective Switch (1xN WSS).

Los primeros ROADMs se construían utilizando las tecnologías PLC (*Planer Lightwave Circuit*) y WB (*Wavelength Blocker*), pero ninguna de ella era óptima para la construcción de ROADMs multi-grado, los necesarios para implementar las redes malladas a las que están orientadas este proyecto. La tecnología PLC sólo permite la construcción de ROADMs de grado dos, y los contruidos con WB no son económicamente viables.

De manera que actualmente la mayoría de ROADMs se construyen utilizando módulos WSS (*Wavelength Selective Switch*), lo que ha supuesto grandes ahorros, tanto en el coste como en la energía empleada. Con estos módulos también se ha conseguido integrar funcionalidades, lo que ha permitido disminuir el espacio que ocupan los equipos. Actualmente los únicos dispositivos que pueden llevar a cabo la conmutación óptica son los módulos WSS, y por tanto, los nodos de las mallas están basados en ellos.

Un módulo WSS consiste en un único puerto óptico común y N puertos opuestos multi-lambda, Figura 23, donde cada longitud de onda DWDM insertada en el puerto común puede ser encaminada a cualquiera de los N puertos multi-longitud de onda, independientemente de cómo se encaminen el resto. Este aprovisionamiento es dinámico y está controlado por una interfaz digital de comunicación de la WSS. Su funcionamiento es bidireccional ópticamente, de manera que si por varios de los N puertos nos llegan múltiples señales para la misma *lambda*, sólo una de estas señales se seleccionará para pasar al puerto común, el resto serán bloqueadas. Además, cada *lambda* encaminada puede ser atenuada de manera independiente, permitiendo así el control del canal y la ecualización.

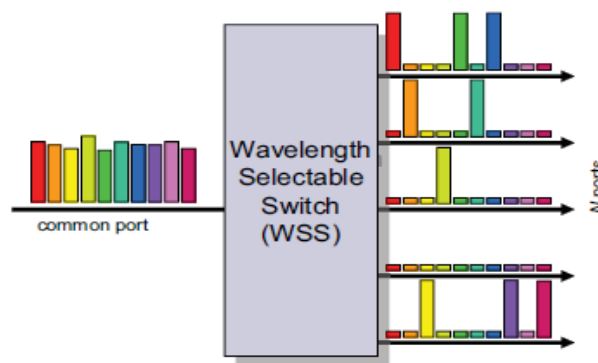


Figura 23: *Wavelength Selectable Switch (WSS)* [8]

Los WSS son los responsables del enrutamiento dinámico, del bloqueo y de la atenuación de las longitudes de onda en cada nodo de la red. Por tanto, el rendimiento de este componente es uno de los atributos dominantes a la hora de determinar el rendimiento de todo el sistema.

Son dos las características de los módulos WSS que afectan directamente el rendimiento de toda la red:

- **Aislamiento del puerto (*Port Isolation*).** Los módulos WSSs son los responsables de bloquear aquellas *lambdas* no deseadas. Éste es un parámetro crítico, ya que un bloqueo insuficiente desembocará en una degradación de la *lambda* que sí debe dejarse pasar. El aislamiento representa la atenuación en la banda de rechazo de cada uno de los puertos del módulo WSS y, por lo tanto, está directamente relacionado con la diafonía introducida por dicho módulo. Los valores típicos de este parámetro oscilan entre 30 y 45 dB.
- **Re-encaminamiento de longitudes de onda adyacente.** Un módulo WSS debe ser capaz de reenrutar de manera independiente longitudes de onda adyacentes a puertos distintos. Para conseguir que el máximo ancho de banda sea transmitido para cada *lambda* el espaciado entre *lambdas* debe ser mínimo. Debemos entender que el ancho de banda de la señal es un parámetro crítico ya que la señal normalmente pasará por un número significativo de módulos WSS, y el ancho de banda irá disminuyendo en función de los WSS por los que pasa.

En resumen, el mejor rendimiento de una red se conseguirá con un aislamiento de puerto y un ancho de banda tan grande como sea posible.

Como hemos visto anteriormente, un módulo WSS tiene varios puertos de entrada y de salida, por lo que es necesaria una rejilla de difracción de gran tamaño que sea capaz de multiplexar y demultiplexar varias señales al mismo tiempo en un único puerto.

El camino de los haces de luz será distinto para cada combinación de longitud de onda, y puerto. Todos ellos deben ser estables y tener pérdidas pequeñas para que sean válidos. Para conseguirlo, se debe controlar el diseño de las trayectorias y de los elementos de conmutación.

El sistema óptico WSS se puede dividir en dos secciones: la sección de longitud de onda, que separa las longitudes de onda de entrada utilizando una red de difracción, y la sección de conmutación, formada por los distintos puertos.

El diseño de la sección de longitud de onda es básicamente un sistema óptico focal, con el que se consigue la separación espacial de las *lambdas*. Se puede considerar como un espectrómetro de alta resolución.

El diseño de la sección de conmutación varía en función del material utilizado.

En el caso del uso de LCoS, la sección de longitud de onda separa las *lambdas* transformando su forma circular en elíptica. En la parte de conmutación, la diferencia de fase de los píxeles de la matriz LCoS, configurable vía software, hacen que la *lambda* se redireccione a un puerto de salida u otro.

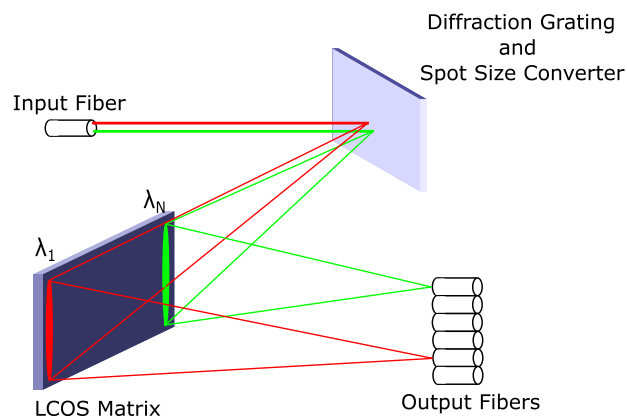


Figura 24: Módulo WSS construido con LCoS.

En cambio, cuando se utilizan MEMS, en vez de diferencias de fase se usan espejos móviles, denominados *actuators*, que cambian su inclinación en presencia de un campo magnético.

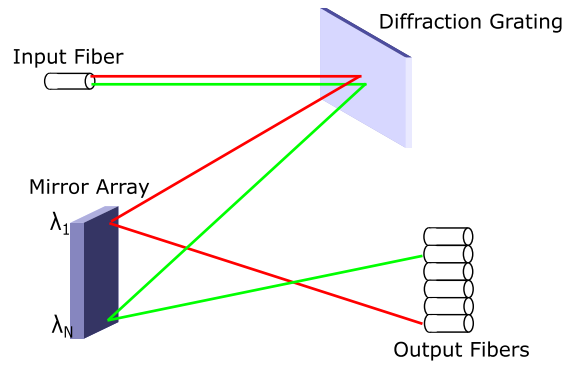


Figura 25: Módulo WSS construido con MEMS.

El uso de la tecnología MEMS proporciona velocidades de conmutación muy rápidas, del orden de microsegundos, pero son propensos al aumento de las pérdidas de inserción. En cambio, los LCoS son más estables pero por lo general el tiempo de conmutación es mayor, del orden de milisegundos, especialmente a baja temperatura.

2.4.2.3. Arquitectura *Broadcast and Select* y *Route and Select*

En los nodos implementados con la arquitectura *broadcast and select* existe conectividad completa. La información recibida en el origen se reenvía a todos los receptores, siendo estos los que seleccionan la información dirigida a ellos y descartan el resto.

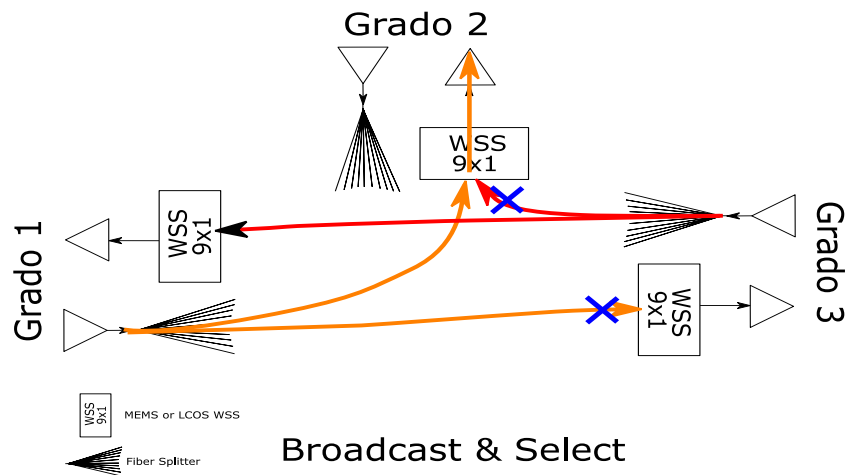


Figura 26: ROADM broadcast and select.

La arquitectura básica de un ROADM *broadcast and select* es la mostrada en la Figura 26. Un *splitter* se encarga de dividir la señal de entrada, enviándola a todos los módulos de extracción de todas las direcciones. Serán los módulos WSS colocados a la salida de cada grado los responsables de bloquear las *lambdas* que no continúan por ese grado, y de combinar las que sí lo hacen con las añadidas en el módulo de inserción.

Las principales ventajas de esta tecnología son:

- Los módulos WSS permiten la atenuación de los canales en paso, lo que permitirá un control automático de los niveles de potencia
- Los costes de instalación inicial son más bajos, ya que se integra la multiplexación, conmutación y ecualización en menos componentes. Sólo aquellos canales que van a ser añadidos o extraídos van a ser enviados a su propia fibra. El resto permanecerán en una fibra común, lo que reduce mucho el número de conectores del nodo, y simplifica mucho la instalación y mantenimiento, todo esto dota al sistema de una mayor fiabilidad.
- Nuevas *lambdas* pueden ser añadidas de una manera más dinámica, sin la necesidad de planificación previa de las rutas, y sin la necesidad de hacer ajustes de potencia ni nuevas conexiones en los equipos intermedios.

Una configuración *route and select* se puede conseguir invirtiendo el orden del *splitter* y el módulo WSS respecto a la configuración de *broadcast and select*. La señal de entrada se enviará a través de un módulo WSS, que se encargará de reenviar solamente las señales que se van a mandar en una determinada dirección y de bloquear el resto.

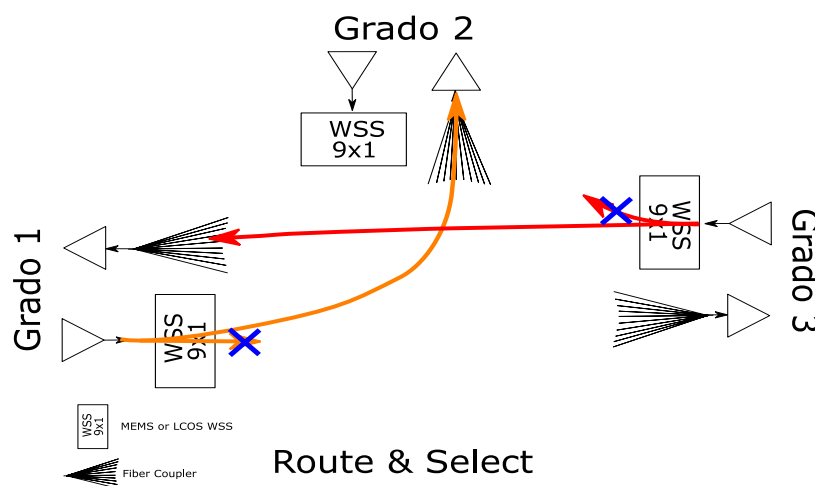


Figura 27: ROADM *route and select*.

La arquitectura *broadcast and select* es la más extendida.

2.4.2.4. ROADMs coloreados y no coloreados

Se llaman ROADMs coloreados o *colored ROADMs* a aquellos cuyos puertos de acceso están coloreados, es decir, aquellos cuyos puertos físicos de acceso, ya sean de inserción o de extracción, están asignados a una *lambda* específica. Una vez que la conexión entre el transmisor y el puerto de acceso al ROADM está hecha, la *lambda* asignada no puede ser cambiada de forma remota.

La inserción/extracción coloreada se implementa simplemente añadiendo filtros basados en *Array Waveguide Grating* (AWG) a la salida tanto de los módulos de inserción como de extracción. Una vez insertados estos filtros a cada puerto, le queda asignada de manera fija una *lambda* que no se podrá cambiar en remoto.

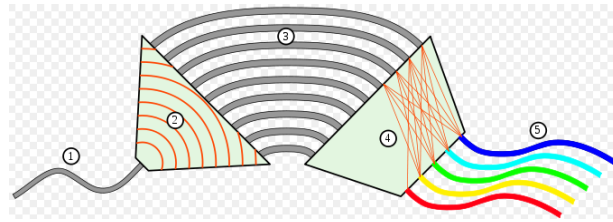


Figura 28: Estructura del Array Waveguide Grating [7]

Los filtros AWG convencionales son circuitos PLC (*Planar Lightwave Circuits*) fabricados colocando capas dopadas y no dopadas de sílice sobre una sustrato de silicio. Consisten en una serie de acopladores de entrada y de salida (1 y 5), una región de propagación en espacio libre (2 y 4) y una serie de guías de onda con un incremento de longitud constante (3). La luz entrante atraviesa el espacio libre y posteriormente entra en un array de guías de onda con distinta longitud, que aplican un desplazamiento de fase diferente a cada haz. A la salida, los haces, se propagan otra vez en otro espacio libre hacia cada puerto de salida, en donde se recibe únicamente luz de una determinada longitud de onda.

Si la trayectoria de la luz va de 1 a 5 funcionará como demultiplexor, y si lo hace de 5 a 1 funcionará como multiplexor.

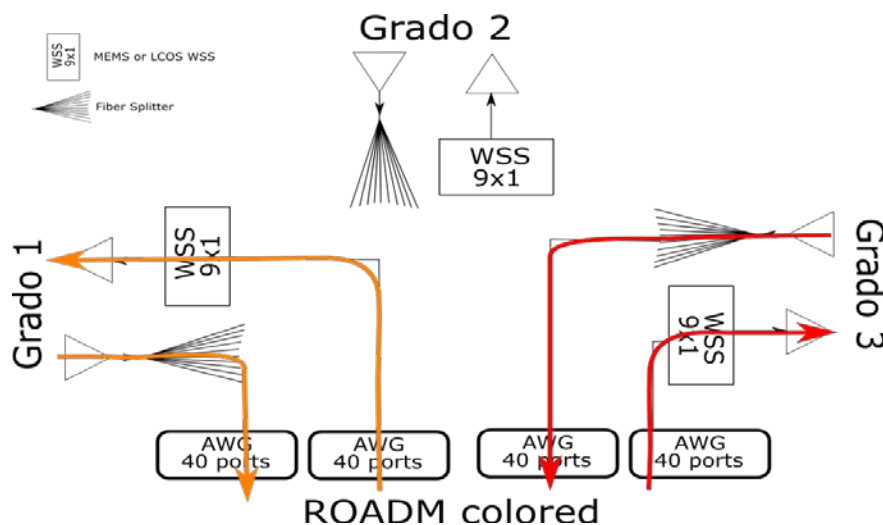


Figura 29: ROADM coloreado

Por otro lado, reciben el nombre de ROADMs no coloreados o *colorless* ROADMs, aquellos en los que se permite que cualquier *lambda* pase a través de cualquier puerto. La *lambda* asignada a un transmisor puede ser cambiada remotamente. Los ROADMs no coloreados son totalmente sintonizables.

Los ROADMs coloreados tienen menores pérdidas de inserción y menor coste, pero si se quiere que una *lambda* reemplace a las ya existentes es necesario hacer conexiones locales para unir el nuevo transpondedor al puerto de inserción/extracción.

Los ROADMs no coloreados no necesitan la instalación de nuevo hardware cada vez que se quiera instalar una nueva λ , siempre y cuando se haya dejado hardware libre con anterioridad.

La capacidad de inserción/extracción es otra de las consideraciones a tener en cuenta al diferenciar estas redes e influye directamente en su costo de despliegue. Es fácil llegar al 100% de capacidad de inserción/extracción en caso de puertos coloreados. En cambio, para llegar a esta posibilidad en el caso de puertos no coloreados son necesarios muchos más componentes que terminan haciendo la red muy costosa.

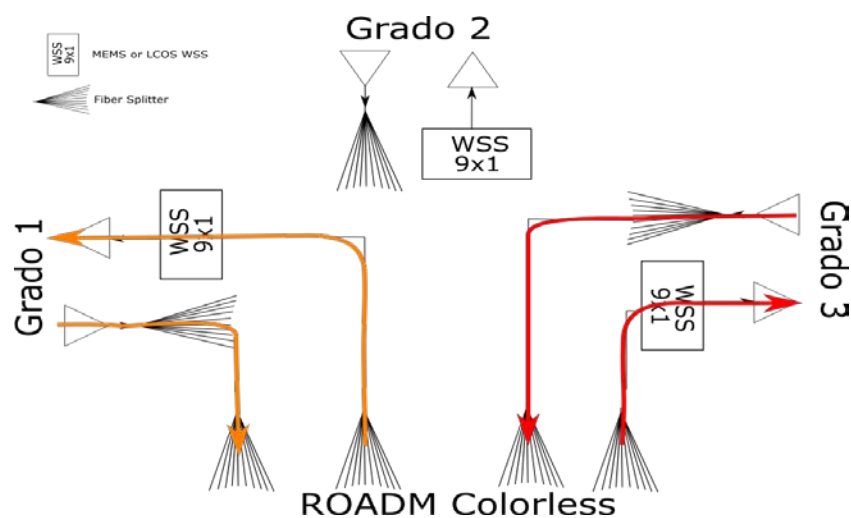


Figura 30: ROADM no coloreado

Para conseguir la funcionalidad no coloreada de una manera fiable, se añadirán dos módulos WSS, uno en la parte de inserción y otro en la parte de extracción. Con esta solución se consigue filtrar el ruido y evitar solapamientos espectrales.

2.4.2.5. ROADM dirigidos y no dirigidos

Se llama ROADMs dirigidos o ROADM *directioned*, a aquellos en los que las λ s pueden ser transmitidas desde/hacia una única dirección.

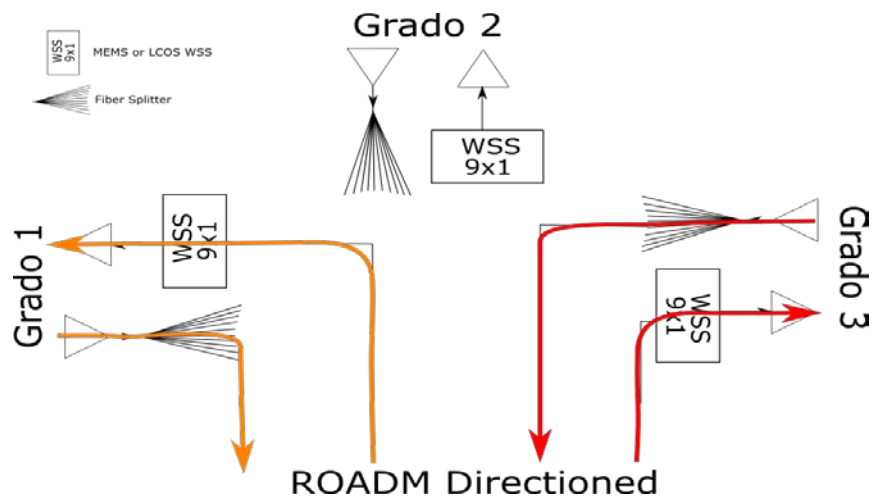


Figura 31: ROADM dirigidos

Se considera que un ROADM es no dirigido cuando las *lambdas* pueden ser transmitidas desde/hacia cualquier dirección. El puerto de salida de las *lambdas* puede ser reconfigurado vía software, no siendo necesario cambiar el cableado.

Para conseguirlo, debemos añadir un WSS y un *splitter* conectados en exclusiva a los filtros AWG.

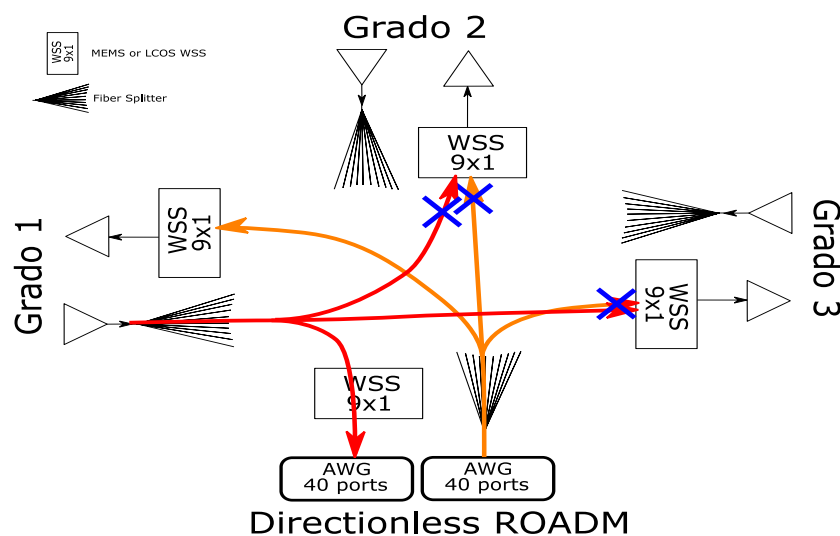


Figura 32: ROADM no dirigidos

El WSS seleccionará la *lambda* a extraer de entre las longitudes de onda que le llegan y la pasará al filtro AWG, mientras que el *splitter* distribuirá a todos los WSS en tránsito las *lambdas* que reciba, serán estos los que se configurarán de forma que dejen pasar o corten una *lambda* determinada.

En el caso de escenarios dirigidos, el camino no puede ser ajustado en remoto, sino que es necesario enviar a alguien en local. *Se usa típicamente en redes no ASON.*

Para los escenarios no dirigidos el ajuste se puede hacer o no en local, dependiendo del resto de la configuración de la red.

La flexibilidad de una red mallada implementada con módulos ROADMs puede ser ampliada implementando las funcionalidades no coloreadas y no dirigidas en cada equipo. Estas funcionalidades consiguen un uso más eficiente de los recursos de red, simplificando en gran medida su arquitectura.

2.4.2.6. ROADMs sin contención

Incluso en el caso de redes ROADMs con las funcionalidades no coloreadas y no dirigidas activas, existen limitaciones que hacen necesaria la intervención manual, es decir, no son redes completamente flexibles.

El problema aparece cuando dos *lambdas* de la misma frecuencia han de ser enrutadas por la misma WSS. Esto provoca el bloqueo de esa *lambda*. Hasta ahora se estaban evitando estas situaciones dividiendo las estructuras de inserción/extracción de forma que ciertas *lambdas* estuviesen asociadas a distintas estructuras. Aunque el problema queda resuelto, esta solución implica una gran pérdida de flexibilidad y eficiencia en el uso de recursos, pudiendo llegar a provocar que se tengan que instalar estructuras de adición/extracción adicionales.

Una estructura sin contención o *contentionless* permite que *lambdas* iguales concurren en la misma estructura de adición/extracción. Esto se logra proveyendo diversidad en el número de rutas que una *lambda* puede seguir hacia cualquier puerto de salida del ROADM.

De la aplicación de todas estas características ha aparecido un nuevo concepto, los ROADMS CDC, que son aquellos que soportan las funcionalidades *colorless*, *directionless* y *contentionless* simultáneamente.

En estas redes cualquier canal, independientemente de su frecuencia, podrá ser conectado con cualquier puerto de salida del ROADM, independientemente del resto de canales que estén en uso.

Para poder implementarlo, la opción más sencilla es duplicar la estructura no coloreada/no dirigida, de manera que haya al menos dos rutas por las que las *lambdas* puedan hacer inserción/extracción.

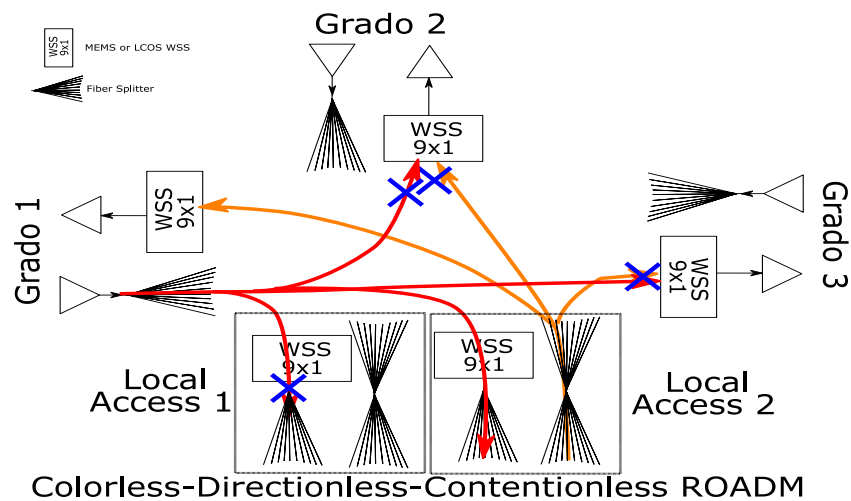


Figura 33: ROADM no coloreado, no dirigido y contentionless (Implementación 1).

La Figura 33 ha sido la primera implementación propuesta, pero existen otras más robustas, como la Figura 34.

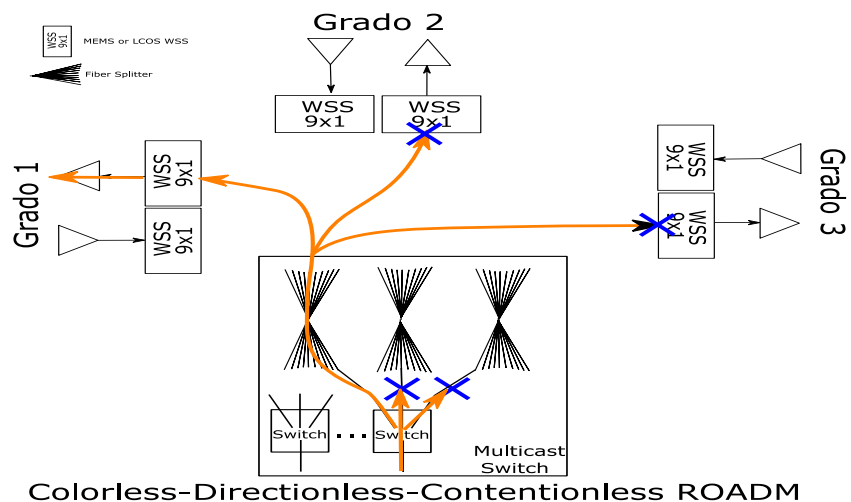


Figura 34: ROADM no coloreado, no dirigido y contentionless (Implementación 2).

Lo primero que debemos tener en cuenta a la hora de hablar de una arquitectura sin contención es el cambio de arquitectura en paso utilizada para su implementación. Como dijimos anteriormente, la arquitectura más común utilizada en la implementación de los canales en paso era broadcast and select, pero se he hecho patente que para conseguir la funcionalidad CDC (*colorless directionless contentionless*) es necesario recuperar la arquitectura *route and select*. Se ha comprobado que es muy complicado construir WSS con el suficiente número de puertos para conseguir esta funcionalidad y que cumplan los requerimientos de aislamiento, tiempos de conmutación, tamaño y precio.

Además de la arquitectura *route and select*, necesita de un conmutador MxN en los módulos de multiplexación/demultiplexación. Existen varias formas de implementar

esta conmutación, pero la más usada es una combinación de divisores de potencia ($1 \times N$) y “*port count 1xN space selection switches*”, que genéricamente se denominan *multicast switches* (MCS). Son estos módulos los que ofrecen la diversidad de caminos de salida hacia los nodos de salida que permite la funcionalidad *contentionless*. Sin embargo, los MCS carecen de la función de filtrado, por lo que es necesario añadir los módulos WSS a la salida de cada grado para eliminar ruido e interferencia.

No todos los fabricantes han implementado esta funcionalidad de la misma manera.

2.4.3. Plano de control ASON (*Automatically Switched Optical Network*)

La estructura del plano de control ASON puede considerarse como la interconexión de tres planos diferenciados:

Plano de Control (GMPLS). Las funcionalidades de este plano son las que verdaderamente separan las redes malladas tolerantes a fallos, de las redes tradicionales integradas horizontalmente. Es aquí donde se establecen, liberan, monitorizan y mantienen las conexiones. También desde aquí se crean de manera automáticas las conexiones extremo a extremo, y es el responsable de la restauración en caso de fallo.

Plano de Datos o de Transporte. Es el plano responsable de las funciones de transmisión propiamente dichas. Es el responsable de la transmisión de las señales ópticas, de la configuración de las interconexiones y de la protección de las señales ópticas

Plano de Gestión. Este plano es un complemento de los planos de control y datos. Se encarga del mantenimiento del plano de control y del plano de transporte. Lleva a cabo funciones de gestión de rendimiento, gestión de configuración, gestión de la seguridad y de los fallos.

Las recomendaciones de la ITU-T respecto al plano de control y su interacción con el plano de transporte y el de gestión están recogidas en la recomendación G.8080 [14]. En ella se establece que el plano de control debe ser fiable, escalable y eficaz, así como lo más genérico posible para permitir la interoperabilidad entre distintas tecnologías y suministradores. A pesar de las recomendaciones se deja libertad a los suministradores en cuanto a la forma de implementarlo.

Existe la posibilidad de dividir el plano de control en distintos dominios de forma que los recursos que pertenecen a un mismo operador, fabricante, etc., se agruparán dentro de un mismo dominio. Estos reciben el nombre de dominios administrativos.

Dentro de estos dominios también se podrán hacer divisiones, como por ejemplo separaciones por regiones geográficas o por áreas de encaminamiento. Estas divisiones ayudarán con la escalabilidad de la red.

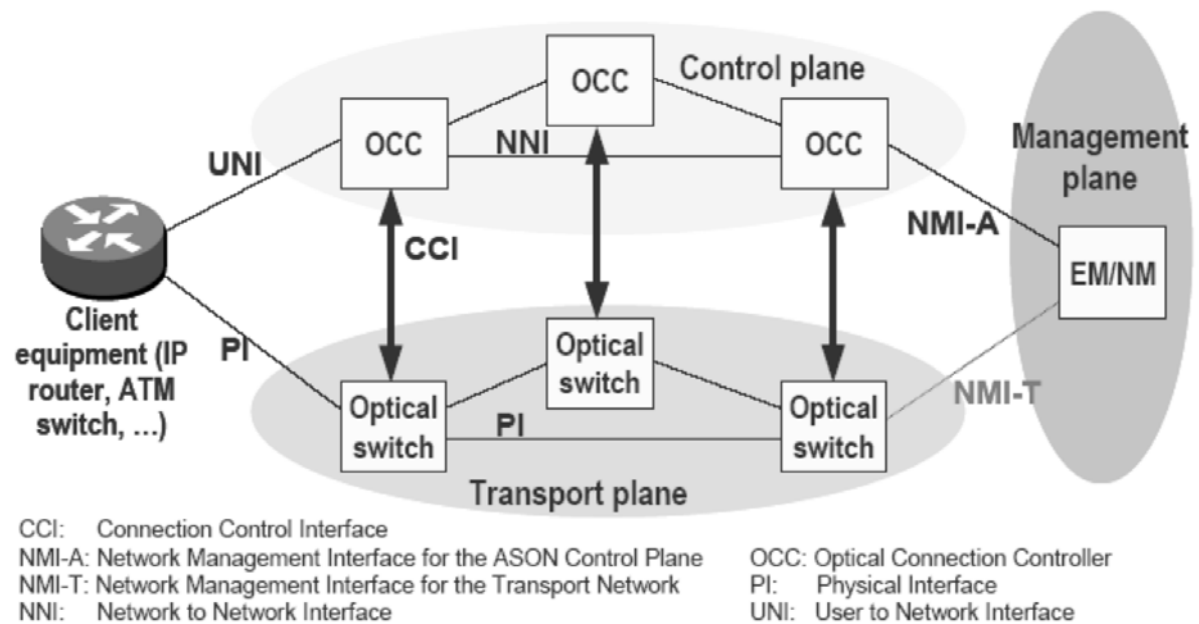


Figura 35: Relación entre plano de control y transporte en una red ASON [13]

La conexión entre los distintos dominios y las áreas de encaminamiento se lleva a cabo a través de puntos de referencia. El intercambio de información a través de estos puntos de referencia se define en términos de interfaces lógicas, tal y como se muestra en la Figura 35.

Dependiendo de la posición que ocupe y por tanto de las funciones que soporten podemos encontrar tres tipos distintos de interfaces:

- **User to Network Interface (UNI).** El punto de referencia definido entre un dominio administrativo y un usuario externo. Se utilizan para solicitar un servicio de la red, la unión entre el usuario y el dominio del proveedor. Al partir de un punto ajeno a la red, y por tanto un punto que no es totalmente confiable, sólo se utiliza para intercambiar información relativa a la petición de un servicio.
- **External Network to Network Interface (E-NNI).** Puntos de referencia existentes entre dominios. A través de ellos se establecen las conexiones multi-dominio. Es un punto con confidencialidad parcial, por lo que solo se intercambia información limitada. Con esta información se quiere conseguir escalabilidad, manteniendo la confidencialidad entre los distintos dominios.
- **Internal Network to Network Interface (I-NNI).** Puntos de referencia dentro de un mismo dominio. Se usan para establecer las conexiones dentro de un dominio. Al unir puntos dentro de una misma red, y por tanto puntos sobre los que se tiene un control total y que son totalmente confiables, se usan para intercambiar tanto información de encaminamiento como de señalización. La información que se intercambia a través de ese tipo de puntos de referencia se usa para: descubrimiento de recursos, control de conexiones, selección de conexiones y encaminamiento de conexiones.

Para gestionar cada uno de los elementos de red se definen los *Optical Connection Controllers* (OCCs). Están compuestos por distintos módulos con la capacidad de encaminar, señalizar y gestionar recursos además de permitir la creación, mantenimiento y supresión de conexiones automáticas.

La conexión entre cada OCC y el elemento de red que controla se lleva a través de los interfaces *Connection Controller Interface* (CCI). Estos interfaces permiten la configuración y la supresión de las conexiones ópticas del plano de control.

La conexión entre los distintos OCCs se lleva a cabo a través de interfaces NNI que se describieron anteriormente.

Algunas de las funciones, como la configuración manual, el desmontaje y la supervisión de los canales, se establecen en el plano de gestión sin pasar por el plano de control. Para este fin se definen dos tipos de interfaces *Network Management Interface* (NMI), el *Network Management Interface for the ASON Network* (NMI-A), que conecta el plano de gestión y el plano de control, y el *Network Management Interface for the Transport Network* (NMI-T), que conecta el plano de gestión y el plano de transporte.

2.4.3.1. Protocolos utilizados en el Plano de Control

De los protocolos utilizados para implementar el plano de control, el más utilizado es *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS). A través de este protocolo se intenta proporcionar alguna de las características de las redes orientadas a conexión a las redes no orientadas a conexión, permitiendo ofrecer así todo tipo de servicios.

A diferencia del protocolo *Multi-Protocol Label Switching* (MPLS) en el que se basa, GMPLS no sólo permite la conmutación de paquetes (*Packet Switched Capable* PSC), sino que también soporta la conmutación en tiempo *Time Division Multiplexing Capable* (TDMC), en longitud de ondas *Lambda Switched Capable* (LSC) y de fibras ópticas *Fiber Switched Capable* (FSC).

En el encaminamiento IP tradicional, cada vez que un paquete atraviesa un equipo, para determinar su destino, se debe examinar además de su dirección de destino otros parámetros de la cabecera, lo que introduce un retardo en cada nodo que atraviesa. La ruta se va adaptando a la tabla de encaminamiento de cada nodo, por lo que, al no poder saber cuál va a ser la ruta final, es difícil reservar recursos y por tanto garantizar la QoS. Además, debemos tener en cuenta que al tener que hacer consultas en la tabla de enrutamiento de cada nodo, se pierde un tiempo que se va incrementando según aumenta la longitud de la tabla.

En contraposición a todo esto, MPLS se basa en la conmutación de etiquetas. A cada paquete se le asigna una etiqueta de longitud fija, basada en criterios como la dirección de destino o los parámetros del tipo de servicio. Esta etiqueta se transporta en su cabecera MPLS. Las etiquetas son asignadas de forma que a los flujos de datos que le llegan por la misma interfaz con el mismo destino *Forward Equivalence Class*(FEC) se le asigna la misma etiqueta. Todos estos paquetes seguirán el mismo trayecto *Label Switched Path* (LSP).

Los nodos de entrada, *Ingress-LSRs*, *Label Switching Router*, reciben los paquetes, los clasifican y le añaden una etiqueta que se encargan de distribuir por la red MPLS. Los equipos interiores *Core LSRs* reenvían los paquetes por la red basándose en estas etiquetas sin tener que perder tiempo procesar la información. Por último los nodos de salida, *Egress LSRs*, quitan la etiqueta antes de enviar el paquete fuera de la red MPLS.

Las principales diferencias entre el protocolo MPLS tradicional y GMPLS son:

- **Separación entre el plano de datos y el plano de control.** En GMPLS la separación de ambos planos puede ser tanto física como lógica. En caso de separación lógica, el tráfico de datos y de control viajan sobre la misma red, pero en una separación física el control de la red se hace a través de una red externa. Por ejemplo, nos podemos encontrar con una red de datos óptica, con un plano de control sobre una red IP tradicional.
- **Etiqueta generalizada, (*generalized label*).** Se introduce para poder soportar dispositivos con distintos tipos de conmutación. Puede representar un paquete, una celda, un *slot* de tiempo, una longitud de onda o una fibra. Su longitud, formato y contenido dependen del tipo de conmutación del enlace.
- **LSP bidireccional.** Todos los LSPs son bidireccionales, teniendo ambos sentidos las mismas características y parámetros de ingeniería de tráfico.
- **Forwarding Adjacency.** Para saltarse la limitación de que un LSP sólo pueda establecerse entre nodos con el mismo tipo de conmutación, se crean LSP's de nivel superior (FA-LSP) que permiten cambios de conmutación intermedios.
- **Link Bundling.** Permite agrupar todos los enlaces con una misma señalización, reduciendo así la información de control que se transmite. Esta opción puede usarse cuando los enlaces tienen como inicio y final los mismos LSR's, tienen el mismo tipo de conmutación y las mismas características de ingeniería de tráfico.
- **Inter-Área LSP.** Permite establecer LSP's inter-área que atraviesan distintos dominios administrativos manteniendo la misma QoS y con rigurosos parámetros de TE (*traffic engineer*).
- **Administración de red.** Se define un sistema de administración de red o *Network Management Service*, (NMS) que permite operar sobre la red, administrarla, mantenerla y aprovisionarla. La comunicación entre los equipos y el NMS se lleva a cabo con el protocolo *Simple Network Management Protocol*, (SNMPv3).
- **Seguridad.** Las redes GMPLS incluyen mecanismos que previenen el riesgo de sufrir ataques que puedan afectar tanto a la red como a la información que transmite.

Para afrontar las funcionalidades básicas de una red, GMPLS utiliza los siguientes protocolos:

- Para el enrutamiento, se dispone del protocolo *Open Shortest Path First* (OSPF) y del *Intermediate System to Intermediate System* (IS-IS), ambos ampliados con extensiones de ingeniería de tráfico (TE). La opción más usada es el protocolo OSPF-TE. Su uso está más extendido al aplicarse en las redes IP.
- Para la señalización, de las dos opciones disponibles *Reservation Protocol with Traffic Engineering* (RSVP-TE) y *Constraint Routed Label Distribution Protocol* (CR-LDP). La primera de ellas la más usada.
- Para la gestión de recursos, se utiliza el protocolo *Link Management Protocol* (LMP).

La función de los **protocolos de enrutamiento** es la de recolectar la información necesaria para formar las tablas de enrutamiento. Se encargan de enviar la topología y los atributos de TE de los enlaces a todos los nodos de la red. Con esta información cada instancia del plano de control es capaz de construir una ruta detallada del resto de la red.

Los más usados en GMPLS son OSPF-TE e IS-IS. Ambos son protocolos de estado de enlace y entran dentro del grupo de los protocolos internos de routing o IGP (*Internal Gateway Protocol*), distribuyen la información de enrutamiento entre routers que pertenezcan a un único AS (*Autonomous System*), grupo de redes bajo una administración común que comparte estrategia de enrutamiento. Están basados en el algoritmo SPF (*Shortest Path First*), cuyo fin es el de determinar dado un equipo origen el camino más corto a todos los equipos de la red.

El **protocolo OSPF** (*Open Shortest Path First*), es un protocolo de enrutamiento dinámico estándar definido en la RFC 2328 [24] para IPv4 y en la RFC 5340 [25] para IPv6, concebido exclusivamente para redes TCP/IP. Utiliza unos paquetes específicos para conocer el estado de los enlaces, LSAs (*Link-State Advertisements*), que son distribuidos a todos los *routers* dentro del área en que están funcionando. Entre otra información, incluyen datos de los interfaces conectados y sus métricas. Los *routers* OSPF acumulan la información del estado de los enlaces y usan el algoritmo SPF para calcular la ruta más corta a cada nodo.

El protocolo OSPF opera dentro de un sistema autónomo, aunque es capaz de recibir y enviar rutas de otros. Un sistema autónomo puede ser dividido en áreas existiendo equipos que las conectan.

Un router con varios interfaces puede participar en varias áreas. Estos routers, denominados ABR (*Area Border Router*), mantienen bases de datos topológicas separadas para cada área y tendrán datos de todas las redes con las que están relacionadas. Al compartir la información, todos los routers tendrán una base de datos topológica igual, y se dice que estos routers comparten un dominio.

La topología de un área es invisible para las entidades que estén fuera de ella lo que disminuye el tráfico de encaminamiento.

El **protocolo IS-IS** es un protocolo de estado de enlace diseñado y desarrollado por DEC (*Digital Equipment Corporation*). Se desarrolló al mismo tiempo que la IETF desarrollaba OSPF y pretendía implementar el protocolo de la capa de red del modelo

OSI llamado CNLP (*ConnectionLess Network Protocol*), aunque posteriormente se adaptó para soportar el enrutamiento del protocolo IP. Al igual que OSPF divide la red en áreas pero a diferencia de él no requiere que las todas las áreas estén conectadas al área 0, no existe un área troncal determinada como en OSPF.

La existencia de dos protocolos de encaminamiento se debe más que nada a una cuestión comercial. Los dos son muy similares, y siguen estando en desarrollo.

En el protocolo GMPLS se entiende como **señalización** la tarea de establecer la ruta (LSP, *Label Switched Path*) entre dos nodos de la red a través de la cual se intercambian las etiquetas. La señalización se puede realizar de manera estática o dinámica. Para la primera de ellas se requiere la configuración manual del LSP en cada nodo, mientras que para la dinámica se necesita de un protocolo de señalización que cree el camino. Para estas labores se propusieron dos protocolos: RVSP-TE y CR-LDP

El **protocolo CR-LDP** (*Constraint-Routed Label Distribution Protocol*). Es la evolución del original LDP y su funcionamiento es bastante parecido al enrutamiento explícito salto a salto. El *Label Request* especifica de forma explícita que rutas van a ser utilizadas. Se reservan recursos para las rutas utilizando características del enlace como: tasa de datos de pico (PDR), tasa de datos comprometida (CDR), tamaño de ráfaga pico (PBS), tamaño de ráfaga comprometida (CBS), frecuencia y peso. PDR y CDR se encargan de las restricciones de velocidad de la ruta, PBS y CBS del tamaño máximo de las ráfagas. Partiendo de la frecuencia que garantiza el CDR y el peso se establecen prioridades relativas en cada nodo para múltiples LSPs cuando hay congestión.

En el protocolo CR-LDP toda la información se intercambia en el momento inicial de configuración. No se necesita que los nodos actualicen el estado del LSP después de configurado. Cuando se determina que un LSP no se necesita, se envían mensajes a todos los nodos notificando que los recursos van a ser liberados.

El **protocolo RSVP-TE** (*Resource Reservation Protocol Traffic Engineering*). Es la evolución del original RSVP. Este protocolo reserva recursos de red de forma unidireccional haciendo uso de los LSP. Se basa en operaciones de petición de respuesta entre los nodos de una ruta. El nodo origen envía un mensaje al nodo destino indicándole los requerimientos de reserva del flujo de tráfico y el nodo destino le envía al origen un mensaje confirmándole la reserva de recursos. El protocolo solicita recursos en una sola dirección, necesitando dos LSPs para llevar el tráfico en ambas direcciones.

En el caso de RSVP-TE, tras iniciar el proceso de LSP, los mensajes de actualización deben intercambiarse periódicamente para informar a los demás nodos que aún se necesita la conexión. Esto permite una actualización más rápida de los cambios, lo que es una gran ventaja en caso de fallos y también ayudan a mantener la sincronización de los equipos. En contraposición, estas actualizaciones redundan en una sobrecarga de procesamiento, una de las debilidades del protocolo.

CR-LDP requiere una menor carga de señalización que RSVP-TE ya que no necesita mensajes de actualización de estado, pero por otro lado una vez que la actualización de mensajes se implementa en RSVP-TE la carga del protocolo disminuye.

A partir de 2003, por una decisión impulsada por los fabricantes de equipos, la IETF decidió enfocarse en el protocolo RSVP-TE, no dando continuidad a CR-LDP.

El **protocolo de gestión** de recursos, **LMP**, definido en la RFC 4204 [30] es un protocolo exclusivo de GMPLS que se utiliza para la gestión y el mantenimiento de los canales de control. Este protocolo se ejecuta entre nodos adyacentes, siendo sus funcionalidades principales las de: mantener la conectividad del canal de control, verificar la conectividad física del enlace de datos, correlar adecuadamente la información del enlace, localizar y notificar fallos, y autenticar los mensajes recibidos.

Para las redes ópticas, debido a la alta capacidad que soportan, es indispensable que su plano de control disponga de mecanismos de protección de datos rápidos y fiables. LMP es capaz de localizar, notificar y mitigar estos fallos, mientras que la detección es gestionada por el nivel físico basándose en la ausencia de señal óptica. Para poder determinar donde se ha producido el fallo es imprescindible la comunicación entre nodos, ya que la ausencia de señal óptica se propaga a todos los equipos que pertenecen al mismo LSP.

El protocolo LMP permite separar los canales de datos y de gestión, consiguiendo que cada uno de ellos pueda protegerse y contabilizarse de manera independiente. Ayuda tanto a localizar un fallo como a verificar la conectividad física entre dos nodos vecinos, ayudando así a reducir la probabilidad de error en la provisión de servicios. Cuando se localiza un fallo, LMP activará los mecanismos de protección y restauración activando otros LSPs alternativos.

2.4.3.2. Protecciones en redes ASON

A medida que se desarrolla una red de transmisión, su capacidad de supervivencia se va convirtiendo aún más en un factor clave en el diseño, así como en la operación y el mantenimiento de la red. En el caso de redes ASON, son dos las posibilidades existentes: protección y restauración, de modo que se puede implementar una u otra o una combinación de ambas.

- **Protección.** Implica la reserva de recursos de red. No necesita del uso del sistema de gestión sino que, cuando aparece un problema, la conmutación se llevará a cabo directamente en el plano de transporte, sin involucrar el plano de control. Se pueden implementar desde los escenarios más sencillos, como la protección 1+1, hasta los más complicados, como la protección ODUk *Spring*.

Los tiempos de conmutación son como máximo de 50 ms. La principal desventaja de esta estrategia para la protección del tráfico es la disminución de la tasa de utilización del ancho de banda. Los recursos de protección pueden ser o no compartidos, pero siempre conlleva una reserva de recursos que no pueden ser utilizados para definir el camino principal del tráfico.

- **Restauración.** Permite la utilización de cualquier recurso disponible en la red. Cuando un LSP falla, el nodo origen calculará la mejor ruta para restaurar el servicio, y mediante señalización se creará un nuevo LSP que llevará el servicio. Dependiendo de si el servicio es revertivo o no revertivo, el LSP original se

borrará o se mantendrá para poder migrar el tráfico de vuelta cuando el camino vuelva a estar disponible.

El reenrutado del servicio implica el cálculo de la ruta, la conmutación del camino y la creación de nuevas conexiones. Al ser bastante más complejo que la protección, la restauración del servicio por lo general tarda más tiempo que cuando se usan la protección. El tiempo exacto depende de cada fabricante.

Por el contrario, la utilización del ancho de banda es bastante más eficiente que en el caso de la protección, es suficiente con reservar menos recursos que el caso de la protección.

La principal topología utilizada para las redes ASON es la de malla, puesto que ofrece una gran escalabilidad y flexibilidad. En comparación con las redes WDM tradicionales, este tipo de red proporciona más de una ruta de recuperación para cada uno de los servicios, de manera que se pueden utilizar mejor los recursos, consiguiendo también mejorar la seguridad de la red.

Gracias a la utilización de estos mecanismos de protección y restauración, las redes ASON son capaces de proporcionar distintas calidades de servicio a los clientes. Permiten crear servicios con un SLA (*Service Level Agreement*) específico. Los SLAs tendrán distintos nombre y características dependiendo del fabricante elegido.

2.4.3.3. Plano de control eléctrico y plano de control óptico

Desde el punto de vista de los modos de conmutación, en el plano de control las redes ASON pueden dividirse en dos: ASON eléctrico y ASON óptico.

ASON óptico. Es aquel en el que el plano de control de la capa óptica trabaja con los servicios a nivel OCh, llevando a cabo la protección por *lambda*.

Los elementos que componen este tipo de redes deberán ser multigrado, es decir, deberán tener más de una dirección a la que poder orientar el tráfico, y no dirigidos, las *lambdas* deben poder ser dirigidas hacia cualquier dirección.

Adicionalmente, aunque ya no es un requerimiento, si poseen la funcionalidad no coloreada, y por tanto los puertos no están asignados a una *lambda* fija, en el caso de que a la hora de restaurar el tráfico que va por una *lambda* con problemas se encuentre un camino válido para su restauración, pero en el que esa *lambda* ya está siendo usada, el tráfico podría pasar a usar una *lambda* distinta.

Es requisito imprescindible que las redes en las que se despliega este tipo de plano de control tengan instalados módulos ROADMs, ya que **de su existencia depende la restauración en caso de fallo.**

Y por último, se presupone un estado óptimo de los cables ópticos que la forman, ya que, al crear un servicio en una red ASON óptica, se comprueba tanto que el servicio puede discurrir por su ruta original como que existen posibles rutas de restauración válidas en caso de que ocurre algún problema en la red. Es decir que tiene valores óptimos de relación señal ruido óptica, *Optical Signal-to-noise Ratio* (OSNR).

La mayor ventaja en la utilización de este tipo de plano de control es que permite disminuir el uso de transpondedores, y que podrá cambiar de dirección y de color lo que permite su uso en múltiples caminos de restauración.

Por otro lado, el mayor inconveniente es un tiempo de restauración mayor que el plano de control con ASON eléctrico.

ASON eléctrico. Se basa en el crecimiento de la red a nivel de ODUk (*Optical channel Data Unit*) y en el enrutamiento por ODU. Se aplica en redes cuyos servicios tengan necesidades de menor granularidad. En estas redes la capacidad de convergencia de las conexiones eléctricas se usa para optimizar el uso del ancho de banda.

El principal problema de estas redes es la necesidad de reservar recursos para la restauración desde un principio. A la hora de crear un servicio se crean tanto su ruta nominal como su ruta de protección, con lo que eso conlleva de ineficiencia en los recursos.

A la hora de la planificación, necesita de un trabajo más exhaustivo. Se tiene que diseñar la red de forma que responda a las necesidades actuales de la red y a las futuras, tanto en el tráfico real como en restauración. Pero por otro lado, la creación de red suele ser bastante más rápida que en redes ópticas. Se crea un canal físico al que se le irá añadiendo tráfico siempre que tenga capacidad disponible.

2.4.3.4. Plano de control centralizado y plano de control distribuido

Otra de las clasificaciones a tener en cuenta a la hora de hablar del plano de control se basa en la manera en que se puede implementar el plano de control para llevar a cabo el aprovisionamiento de circuitos y la gestión de red.

Generalmente los protocolos GMPLS se asocian a un plano de control distribuido, en el que los nodos descubren automáticamente la topología de la red y las funcionalidades de sus nodos vecinos. Todos tienen la misma visión y cualquier cambio se difunde automáticamente para que todos los nodos tengan constancia de él. Este tipo plano de control, que se ha implementado fácilmente y con éxito en muchas redes, se convierte en un desafío en el caso de las redes de transporte.

Con un plano de control distribuido se consigue una mayor disponibilidad y resistencia antes cambios en la red, ya que se ajusta automáticamente. Pero para ello, todos los nodos deben ser compatibles con los protocolos usados y ser capaces de enviar información del estado. Su utilización en redes de gran tamaño y con cambios frecuentes puede afectar a la escalabilidad de éstas.

La otra opción es el uso de un plano de control centralizado. En este caso la información no estará distribuida, si no que estará centralizada en una única aplicación que tendrá una visión completa del dominio de red y de los elementos que la forman. Se podrán automatizar completamente las tareas de establecimiento y creación de circuitos y llevarlas a cabo desde un gestor centralizado, que recibe el nombre de EMS (*Element Management System*) o NMS (*Network Management System*).

Se utilizará un PCE (*Path Computation Element*) que será el responsable del cálculo del camino. Debe considerar todas las rutas, los recursos de cada nodo, la topología y conectividad de los recursos, así como las posibles restricciones. Además, en redes como estas en las que se usan ROADMs y amplificadores ópticos, debe ser capaz de predecir la viabilidad de la implementación de los circuitos ópticos candidatos teniendo en cuenta los requerimientos ópticos preestablecidos.

El control centralizado sólo necesita de recursos de cálculo en el controlador principal. Es habitual el uso de controladores redundantes para protegerse ante cualquier caída o fallo del principal. Cualquier cambio de software necesario en el plano de control sólo tendrá que realizarse en este controlador principal y no en todos los nodos de la red.

Al estar centralizados tanto el cálculo del camino como la visibilidad global de la red, todos los equipos deben poder interoperar con el gestor centralizado.

Aunque es posible diseñar una arquitectura de red de transporte con plano de control distribuido, es más fácil y habitual la implementación del plano de control centralizado, con servidores redundantes en las redes que enruten circuitos ópticos en un mismo dominio.

3. Requisitos para el diseño de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León

3.1. Introducción

Desde 1988 existe una red de comunicaciones de alta capacidad a disposición de las universidades y centros de I+D españoles que permite comunicar las redes académicas entre si y con las redes de Europa y del resto del mundo. Esta red recibe el nombre de RedIRIS.

Gracias al proyecto RedIRIS-Nova se ha dado un salto cualitativo en esta red, ya que se ha pasado de un modelo de alquiler de capacidad, a un modelo de contratación de fibra oscura en el que el equipamiento óptico pasa a ser gestionado por el Ente Público Empresarial Red.es. Gracias a este nuevo modelo se dispondrá de una red más flexible, que ofrece más capacidad, permite el despliegue de nuevos servicios y que reduce el coste del servicio a medio y largo plazo.

La red está estructurada de tal manera que RedIRIS proporciona los enlaces troncales nacionales y el acceso desde cada comunidad autónoma al *backbone* central de la red, siendo responsabilidad de cada comunidad autónoma el desarrollar su propia red autonómica que intercomunique sus centros.

A principios de 2015 la Junta de Castilla y León lanzó un concurso público para la creación de una nueva red. La finalidad de está RFQ (*Request for Quotation*) es la de crear la red de investigación autonómica de Castilla y León. Esta región con 95.000 km² de extensión, es la tercera región más grande de Europa. En la comunidad existen ocho universidades (cuatro públicas y cuatro privadas) con campus en las nueve provincias, siete organismos públicos de investigación, dos Instalaciones Científico-Tecnológicas Singulares (ICTS), tres parques tecnológicos, cuatro parques científicos, cinco hospitales universitarios, y varios laboratorios y centros de investigación de la Junta de Castilla y León.

La Red de Ciencia y Tecnología de Castilla y León conectará los campus de las cuatro universidades públicas repartidos por las 9 provincias de la Comunidad Autónoma, y los centros de investigación e Instalaciones Científico-Tecnológicas Singulares entre sí y con el resto de las redes de ciencia y tecnología de investigación internacionales. Dotará a los investigadores de esta región de las capacidades y servicios de valor añadido asociados a redes de fibra oscura, y les permitirá comunicarse con otros centros de I+D+i nacionales e internacionales.

La Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León (FCSCCL) ha sido designada por la Junta de Castilla y León para realizar el proyecto y despliegue de la red así como su posterior operación. Es también el interlocutor único con RedIRIS.

El proyecto consta de dos subproyectos: el tendido de la red de fibra y la puesta en marcha del equipamiento óptico y de conmutación necesarios para la creación de esta red. Es el segundo de estos el que utilizaremos para explicar el diseño de una red DWDM mallada con Plano de Control (ASON).

En la siguiente figura se muestra el plano de los emplazamientos que forman la red, las conexiones que se deben establecer entre ellos y la distancia que los separa.

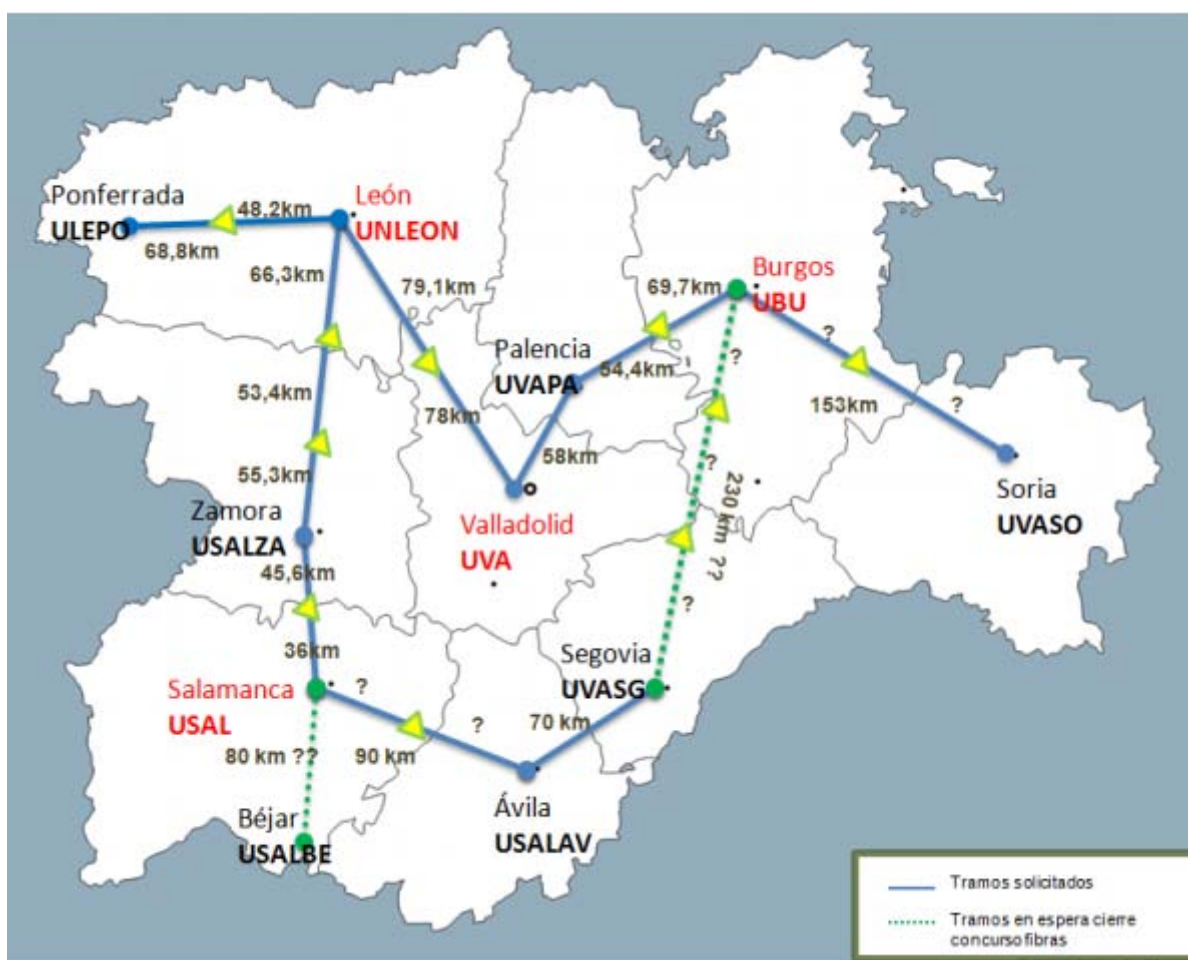


Figura 36: Mapa de huella de los emplazamientos a conectar [17].

3.1.1.PROPUUESTAS TÉCNICAS

El proceso habitual cuando se va a crear una nueva red y se quieren estudiar las distintas posibilidades existentes en el mercado antes de decantarse por una en particular, es la creación de una RFQ (*Request for Quotation*).

Una RFQ es un proceso cuyo objetivo es invitar a los fabricantes a un proceso de licitación en el que cada uno dará su propuesta para el servicio requerido, siendo los

convocantes quienes elegirán la opción más acorde a sus intereses. La respuesta del fabricante debe incluir tanto la propuesta técnica como una especificación de requisitos técnicos en los que se indiquen cuales cumplen y cuáles no. La propuesta debe cumplir con los requisitos técnicos solicitados, e irá unida de una valoración económica de la solución.

El diseño de la red que vamos a llevar a cabo se va a realizar partiendo de la RFQ: “Contrato de Suministros de Equipamiento de Multiplexación óptica para la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León” (se puede consultar en <https://www.fcsc.es/index.php/es/perfil-del-contratante/licitaciones-cerradas/254-fcsc-02-2014>).

Como todas las RFQs creadas para este tipo de redes, consta de varios apartados en los que se explican los requisitos y funcionalidades mínimas de la que debe estar dotada la red (Requisitos de Obligado Cumplimiento, R.O.), y otros apartados en los que se describen funcionalidades que son interesantes para el convocante y por tanto serán valoradas positivamente si son incluidas en la solución final (Requisitos Valorables Positivamente, R.V.). Por último, y para que el licitador pueda dar una solución que se ajuste lo más posible a la realidad, se realiza una descripción detallada tanto de la topología como de las necesidades de tráfico.

En los siguientes apartados se van a ir explicando posibles respuestas a esta RFQ, desde las más básicas que sólo cubrirían los requisitos de obligado cumplimiento, hasta las más sofisticadas y complejas, en las que se tendrán en cuenta tanto funcionalidades que el convocante ha declarado que son interesante para él, como configuraciones que a mi modo de ver pueden resultarle ventajosas. Para todas ellas, además de la explicación de la solución técnica, se hará una valoración de sus ventajas e inconvenientes.

A la hora de diseñar una red DWDM mallada con plano de control, son varios los aspectos importantes a tener en cuenta: tipos de tráfico, configuración de los ROADMs, amplificadores, tipos de plano de control, etc.

En un primer momento, y teniendo en cuenta los requisitos de esta RFQ, sólo nos vamos a fijar en las partes que representarán un cambio más significativo entre una y otra solución, las configuraciones de los ROADMS y de los Interfaces de línea. Posteriormente, para la solución que se elija como definitiva para enviar al cliente, se revisarán aspectos más generales como los amplificadores a utilizar, el plano de control, etc.

3.1.1.1. SOLUCIÓN BÁSICA

Las especificaciones básicas pedidas por el cliente para los aspectos que de momento vamos a analizar son:

- R.0.1- El sistema ofertado deberá tener una capacidad mínima de **40 *lambdas* de 10Gb/s** en cada una de las secciones ópticas de la red. Dicho crecimiento se debe ofrecer de forma no intrusiva (sin cortes de tráfico sobre los servicios ya existentes). Se garantiza de esta forma un crecimiento futuro, de forma no traumática.

- R.O.7 - El equipamiento de un nodo soportará la conexión de, al menos, las vías indicadas en la Tabla 1 para la inserción/extracción de canales, de forma que cualquiera de las *lambdas* que llegan por una de las vías pueda bien bajarse o extraerse en local (o insertarse), bien dejarse en paso a otra cualquiera de las vías no locales. Lo que implica que los nodos sean mínimo ROADMs básicos **direccionales y coloreados**.
- R.O.8 -Interfaces clientes soportados: **10 GbE LAN-PHY/WAN-PHY; 1 GbE; 4G FC, 8GB FC y 10G FC**
- R.O.10 - El equipo debe soportar e implementar mecanismos de protección frente a caída física de circuitos (**protección 1+1**). La protección se hará en la capa óptica (a nivel de canal óptico, Och).

NODO	Debe soportar la conexión mínima Nº Vías + vía local	Equipado con Nº Vías + vía local
ULEPO	1x1	1x1
ULE	4x1	3x1
USALZA	2x1	2x1
USALBE	1x1	1x1
USALAV	2x1	2x1
USAL	4x1	3x1
UVAPA	2x1	2x1
UVASG	2x1	2x1
UVASO	1x1	1x1
UVA	4x1	2x1
UBU	4x1	3x1

Figura 37: Vías soportadas y vías equipadas [17].

Configuración de los ROADMs:

Como podemos ver en la tabla anterior, el máximo número de vías solicitado por el cliente es de 4x1, así que tomaremos este como ejemplo para el diseño.

Es interesante comenzar la descripción explicando que, para llevar a cabo una configuración direccional y coloreada, no es necesario implementar una vía local para la inserción/extracción de tráfico en el nodo, sino que sería suficiente con añadir una combinación de multiplexador/demultiplexador a la WSS que envíe el tráfico hacia la dirección en la que estemos interesados. La transponedora en la que se inserte la señal de cliente estará conectada a esa combinación de multiplexador/demultiplexador.

En cuanto a requerimientos hardware, la solución óptima, al ser suficiente y la más económica, sería utilizar 4 tarjetas WSS de 4x1 puertos. De ellos, 3 puertos se usarían para la dirigir el tráfico en paso para cada una de las direcciones, y el cuarto quedaría libre para la inserción/extracción del tráfico que vaya en esa dirección.

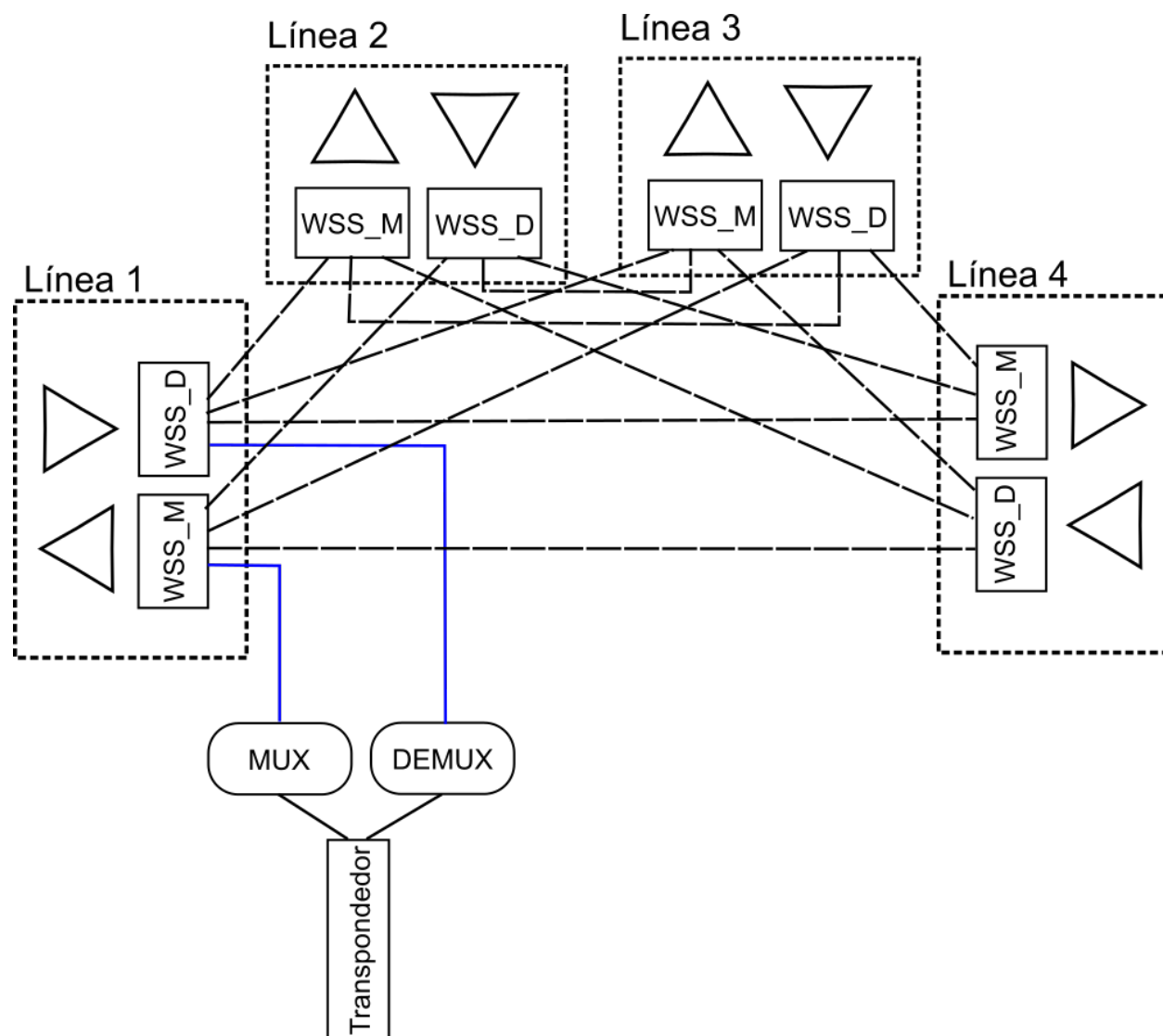


Figura 38: Solución básica.

Aunque como se ha dicho al principio la capacidad requerida es de 40 *lambdas*, en el caso en que se quisiese llegar a la capacidad de 80 *lambdas*, valorada positivamente en la RFQ (R.V 3), tendríamos dos posibilidades, o bien instalar una tarjeta WSS de 9 puertos en lugar de las WSS de 4 puertos especificadas anteriormente, o bien instalar un hardware adicional que permita la mezcla de canales provenientes de dos multiplexadoras /demultiplexadoras de 40 *lambdas* para llegar a la solución de 80 *lambdas*.

Un ejemplo de esta configuración sería la Figura 39. Se instalarían dos multiplexadores y dos demultiplexadores que suman un total de 80 puertos, que quedarían disponibles

para conectar los transpondedores. La señal de los multiplexadores pasará a otra tarjeta que actuará como mezclador dando como resultado la señal de 80 *lambdas*.

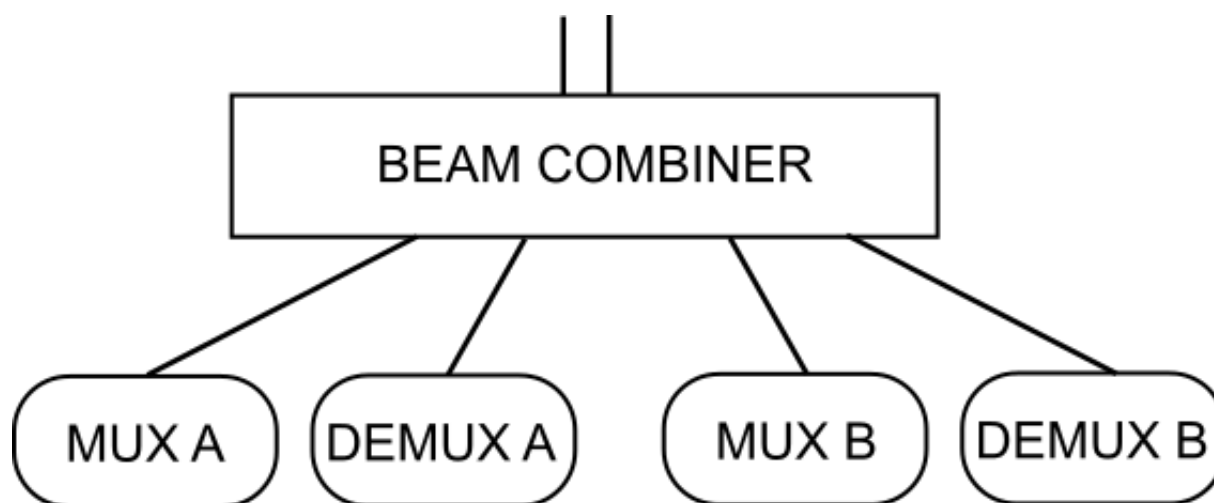


Figura 39: Solución para llegar a 80 *lambdas*

Interfaces de Línea

En cuanto a los interfaces de línea, el requerimiento de tráfico inicial no supera los 10G, por lo que sería suficiente la instalación de tarjetas de 10G con modulación no coherente. Como ya se ha explicado anteriormente, la modulación no coherente hace necesaria la instalación de módulos DCM para compensar los efectos de la dispersión cromática.

Para esta red, y debido a las necesidades de tráfico explicadas en la RFQ: *lambdas* de 10GB y circuitos de 1 GBE a cursar en *lambdas* de 10GB, se utilizarán parejas de transpondedores de 10G y multiplexores de 1Gb/s que agrupen varias señales de cliente en un único canal de 10Gb/s.

Uno de los requisitos de obligado cumplimiento es la implementación de protecciones 1+1 a nivel de capa óptica. Esta protección de canal OCh se puede implementar usando hardware que divida la señal OCh a la salida del *transponder/muxponder*. Este hardware hará las veces de divisor de la señal óptica, permitiendo enviar el mismo camino OCh por dos vías distintas y, por tanto, por dos caminos distintos hasta su destino. En recepción, este hardware se encargará de seleccionar uno de los dos canales que recibe, y en caso de fallo en el canal que está en funcionamiento, seleccionará el canal que le llega a través de la ruta de protección.

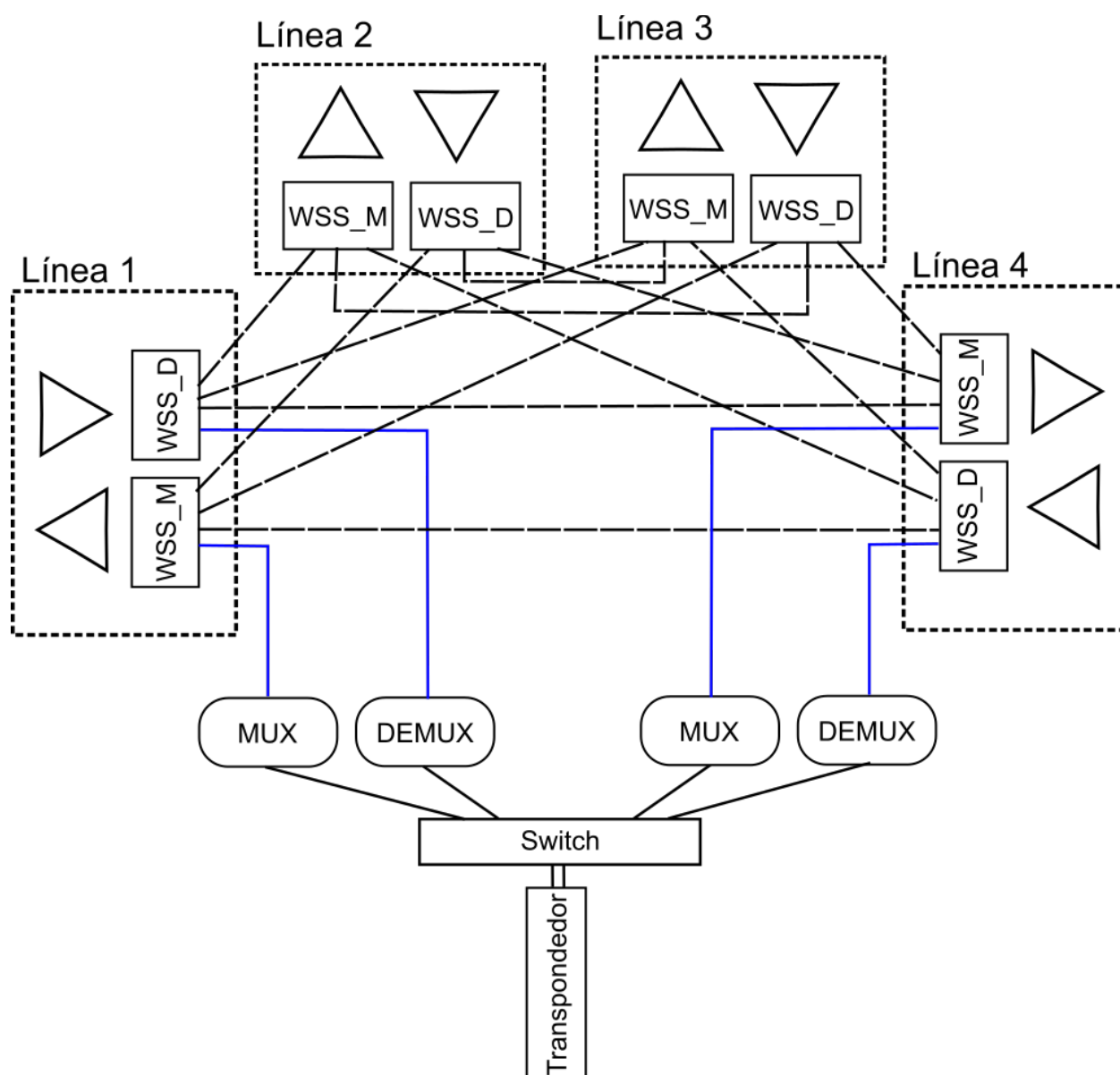


Figura 40: Solución básica con protección.

VENTAJAS. La principal ventaja de esta implementación es la simplicidad. Esta sencillez hace de ella la solución más económica que satisface los requerimientos de obligado cumplimiento del cliente.

INCONVENIENTES.

- La instalación de tarjetas de interfaces con modulación no coherente y la consiguiente instalación de módulos DCM penaliza el futuro crecimiento de la red hacia capacidades de 100G y mayores.
- La configuración diseñada para los ROADMS aportaría poca flexibilidad a una red mallada. Permitiría reencaminamientos intermedios pero, al tratarse de una configuración direccional, no existiría la posibilidad de reencaminar en los nodos terminales.

3.1.1.2. SOLUCIÓN MEJORADA 1

Como primera solución mejorada añadiremos a los requisitos anteriores el especificado en la R.V 2 - Para los nodos con dos o más vías de línea, se valorará que el tráfico local enrutado inicialmente por una determinada vía de línea, pueda ser reenrutado o conmutado a cualquiera de las otras vías del nodo, sin intervención local de un técnico.

Es decir, vamos a implementar la red con la funcionalidad *directionless* en los nodos ROADMs.

Configuración de los ROADMs:

Para conseguir la funcionalidad *directionless* es necesario añadir una vía local, dedicada para la inserción/extracción del tráfico insertado en ese nodo, que permitirá reenviarlo en todas las direcciones sin necesidad de intervención física en el nodo.

Respecto al hardware, para los ROADMs de 4 vías e implementado la solución obligatoria de 40 canales, sería suficiente con utilizar 4 tarjetas WSS de 4x1 puertos.

La solución para conseguir una capacidad de 80 canales sería la misma que se ha descrito para la solución básica.

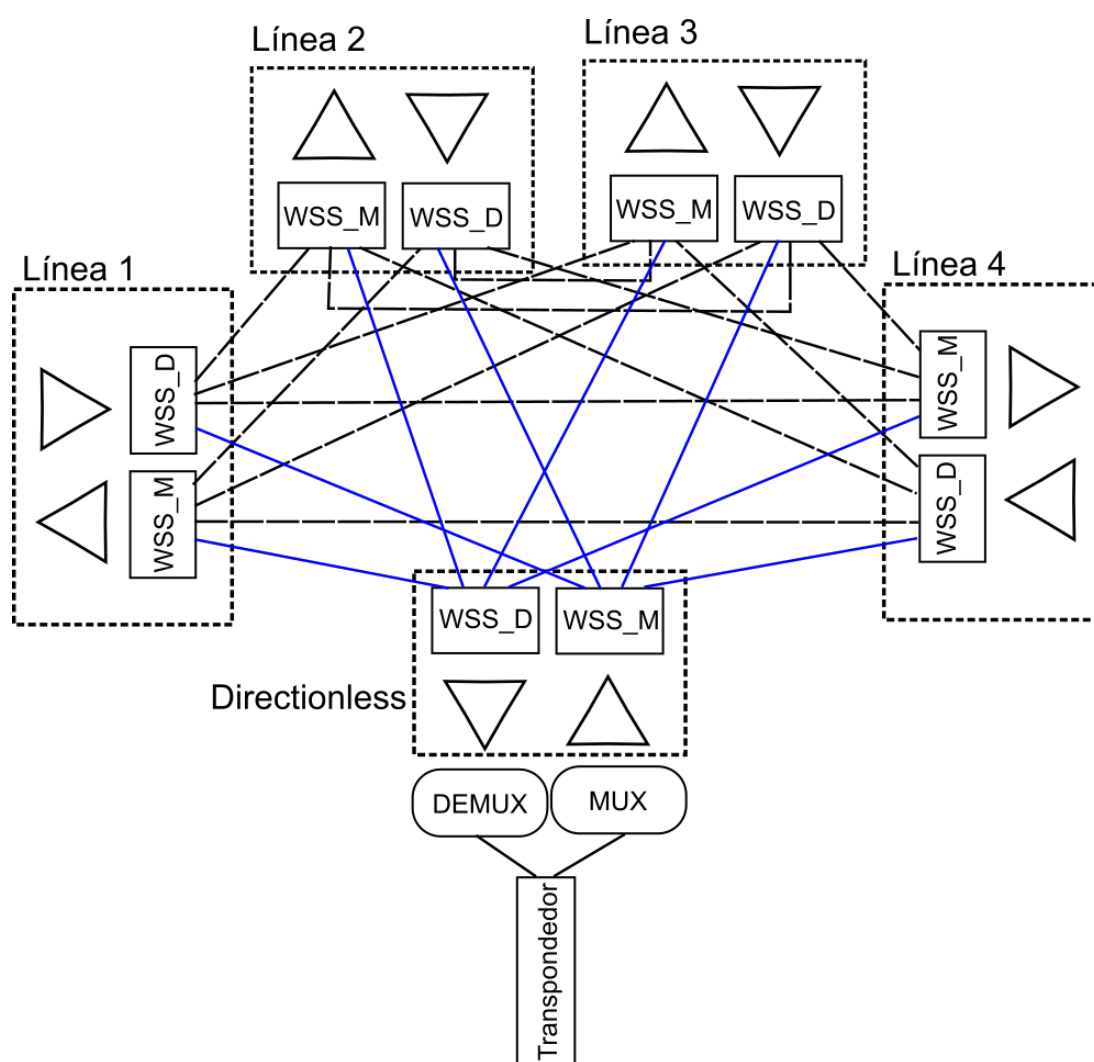


Figura 41: Solución mejorada 1.

Interfaces de Línea

Al igual que en la solución anterior, para responder al requerimiento inicial de tráfico de 10G sería suficiente con instalar tarjetas de 10G de modulación no coherente y módulos DCM para la compensación de la dispersión cromática.

A la hora de implementar la protección 1+1 debemos tener en cuenta que, al haber una única vía local (una única tarjeta WSS en la que se inserta el tráfico) y al no poder utilizarse dos veces la misma longitud de onda en una tarjeta, la señal no podría enviarse por dos vías distintas. Para llevar a cabo la protección sería necesario duplicar el número de transpondedores. La señal de cliente debe introducirse en un *splitter* que la envíe a dos transpondedores distintos y que, por tanto, genere dos longitudes de onda distintas que, ahora sí, podrán introducirse en la vía local y enviarse en dos direcciones distintas.

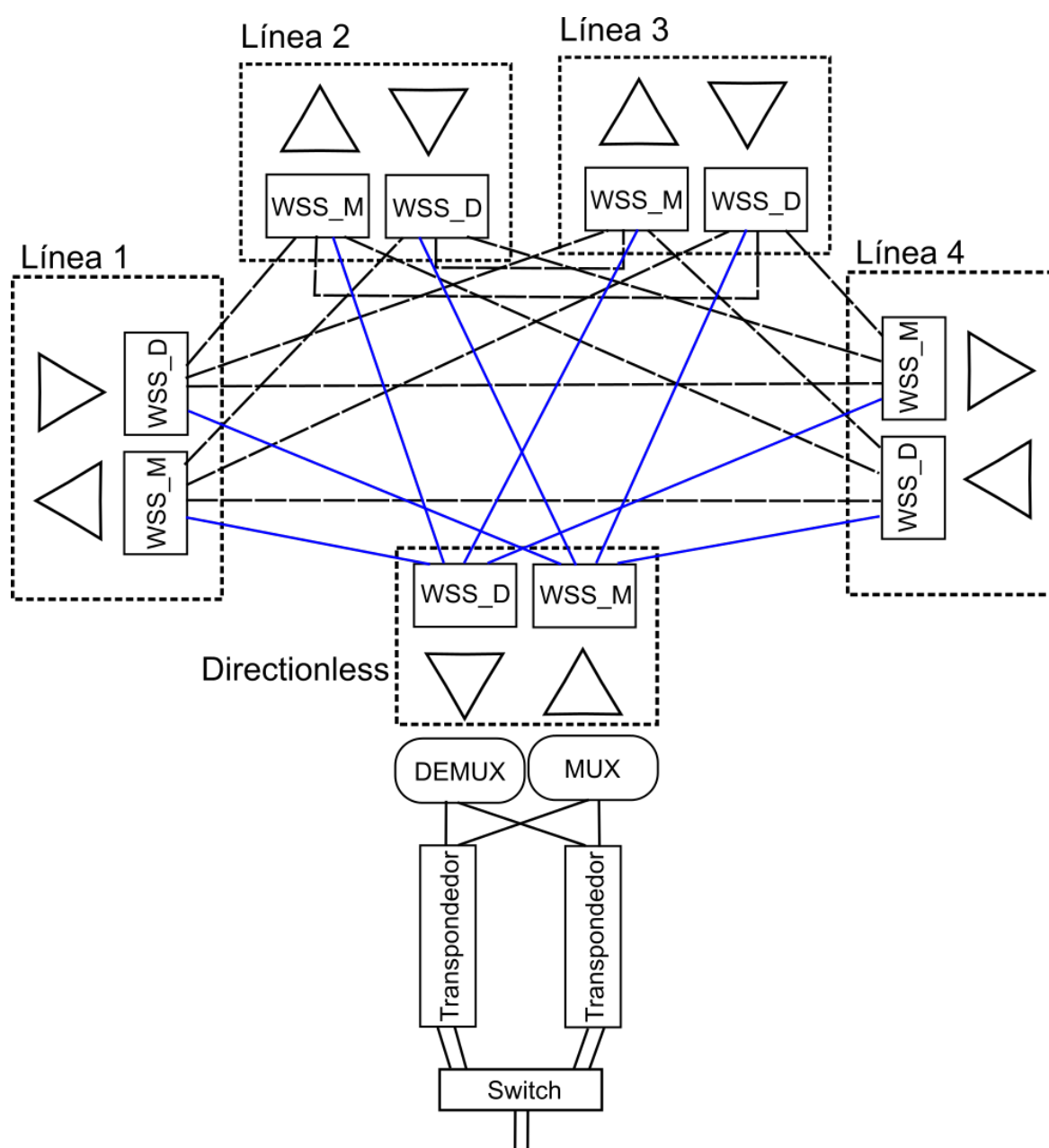


Figura 42: Solución mejorada 1 con protección.

VENTAJAS. Al habilitarse la funcionalidad *directionless* se dota al sistema de una mayor flexibilidad al dejar disponibles más caminos para el tráfico. En caso de que se habilitase el plano de control, aumentarían las posibilidades de restauración, tanto en los nodos intermedios como en los nodos terminales.

INCONVENIENTES.

- Para implementar la protección 1+1 del tráfico, y debido a que sólo existe una vía local, será necesario duplicar los transpondedores con el consiguiente incremento de coste.
- En caso de decir implementar la protección 1+1 explicada anteriormente, al estar los canales principal y de protección en la misma vía local, ésta se convierte en punto único de fallo. Cualquier problema hardware en esta tarjeta haría inútil la protección.
- Al haber restricción en el número de *lambdas* por la vía local, si una *lambda* se está utilizando hacia una vía de línea, esa misma *lambda* no puede reutilizarse para añadir tráfico hacia otra vía de línea. La capacidad de canales del nodo es de 40 (u 80) *lambdas*.

3.1.1.3. SOLUCIÓN MEJORADA 2

Esta segunda solución mejorada implementa el requisito R.V.6.- Se valorará positivamente que el equipamiento propuesto permita equipar como mínimo dos vías de tráfico local *directionless* para el caso que se decida en el futuro dotar de mayor robustez al sistema en servicios con protección de canal óptico. La **incorporación de una nueva vía de tráfico local *directionless*** se debería realizar sin cambio del hardware ya desplegado y sin afectar al tráfico en servicio a través de otras vías locales.

Con esta nueva solución desaparecerá el punto de fallo único creado en la solución anterior. Conseguiremos una solución más robusta para la que además se habrá disminuido el coste de la protección.

Configuración de los ROADMs:

Esta segunda vía local, al igual que la primera, se conseguirá mediante una nueva combinación de tarjetas WSS que llevará cabo la multiplexación y demultiplexación de canales.

En el caso de los nodos de 4 vías, esta solución implicaría que ya no se pudiesen utilizar las tarjetas WSS de 4x1, puertos ya que no tendrán capacidad suficiente, tres puertos son necesarios para enviar el tráfico en todas las direcciones, y dos más para la conexión de cada una de las vías de línea con las vías locales. Por tanto, pasaríamos a necesitar 6 tarjetas WSS de 9X1 puertos.

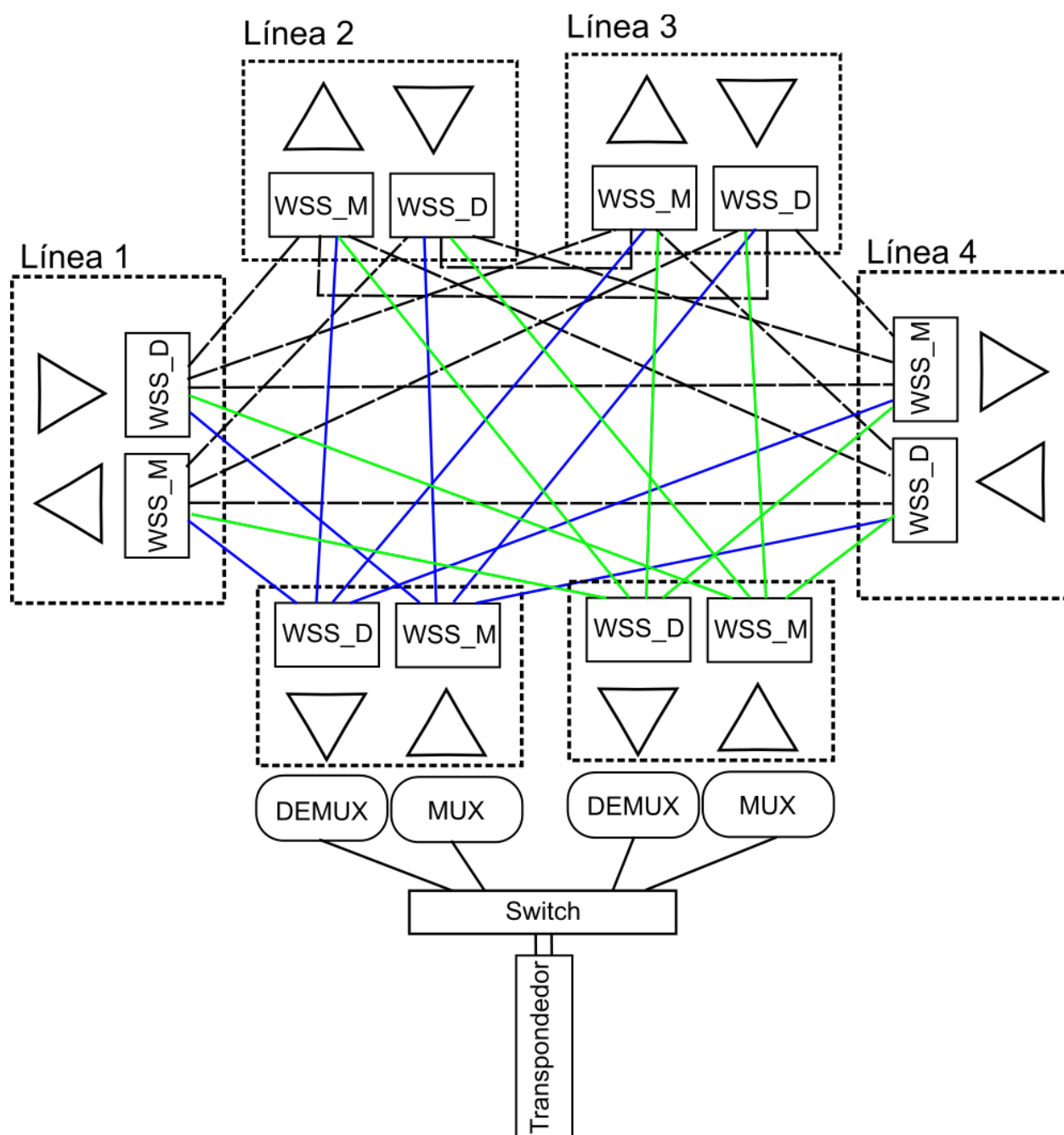


Figura 43: Solución mejorada 2.

Interfaces de Línea

Como en todas las soluciones implementadas hasta ahora, las necesidades de tráfico se podrían cumplir con canales de 10G no coherentes.

En cuanto a la protección de tráfico, utilizando un *splitter* que divida en dos la señal insertada en el nodo, se podría enviar la misma longitud de onda a las dos vías locales, y por tanto eliminar el punto único de fallo. Gracias a esta nueva implementación sería posible llevar a cabo una protección a nivel de canal OCh.

VENTAJAS.

- Eliminación del punto único de fallo. En caso de que el hardware de una de las dos vías locales tenga algún problema, quedará disponible la otra vía para enrutar el tráfico.
- La segunda vía local dotará al nodo de una mayor capacidad. Con la configuración anterior en la que solamente existía una vía local, se está limitando la capacidad de todas las vías de línea a una configuración de 40/80 *lambdas* (según sea el diseño), ya que la misma *lambda* no se podrá utilizar en más de una vía. Al añadir una segunda vía local, la capacidad del nodo se duplica, la misma *lambda* se podría utilizar en dos vías de línea distintas.
- La segunda vía local aumenta la flexibilidad de restauración en los casos en los que se desee añadir plano de control.
- Permite realizar un balanceo de carga de canales en las vías locales.
- En cuanto a las protección 1+1, esta configuración permite la implementación de dos protecciones distintas. La protección OCh (más económica) y la protección de cliente 1+1, más cara pero que también protegerá a los transpondedores.

INCONVENIENTES. Aumento del coste. Por un lado debemos contar con que algunas tarjetas WSS utilizadas tienen que pasar de 4x1 a 9x1 puertos, y por el otro, debemos de tener en cuenta el hardware adicional que implica instalar una segunda vía.

3.1.1.4. SOLUCIÓN MEJORADA 3

En esta tercera solución mejorada se implementa el requisito R.V 4.-Se valorará que el equipamiento propuesto para las vías locales de los ROADMs, soporte conversiones de color en los canales ópticos, extremo a extremo, (para más de 8 canales ópticos), de forma automática para evitar bloqueo de *lambdas*.

En esta ocasión lo que se está solicitando es dotar a la red de la funcionalidad **colorless**.

Configuración de los ROADMs:

Esta solución se podría aplicar tanto a la solución con una vía local (solución mejorada 1) como a la solución con doble vía local (solución mejorada 2).

Para conseguir la funcionalidad *colorless* se van a sustituir los multiplexadores/demultiplexadores fijos de la vía local por tarjetas WSS.

Será necesaria la instalación de dos etapas de tarjetas WSS:

- La primera etapa comprende aquellas tarjetas WSS a las que se conectarán los transpondedores. Para llegar a la solución final de 80 canales será necesario utilizar tarjetas WSS de 9x1 puertos. Las tarjetas se podrán instalar de forma progresiva según vayan aumentando las necesidades de tráfico de la red. La capacidad máxima se conseguirá una vez se hayan instalado las 9 tarjetas WSS.

- La segunda etapa hará las funciones de agrupador/separador de la señal que llega y va hacia la primera etapa. Se reemplazaran los multiplexadores/demultiplexadores fijos de la vía local utilizados hasta ahora por tarjetas WSS.

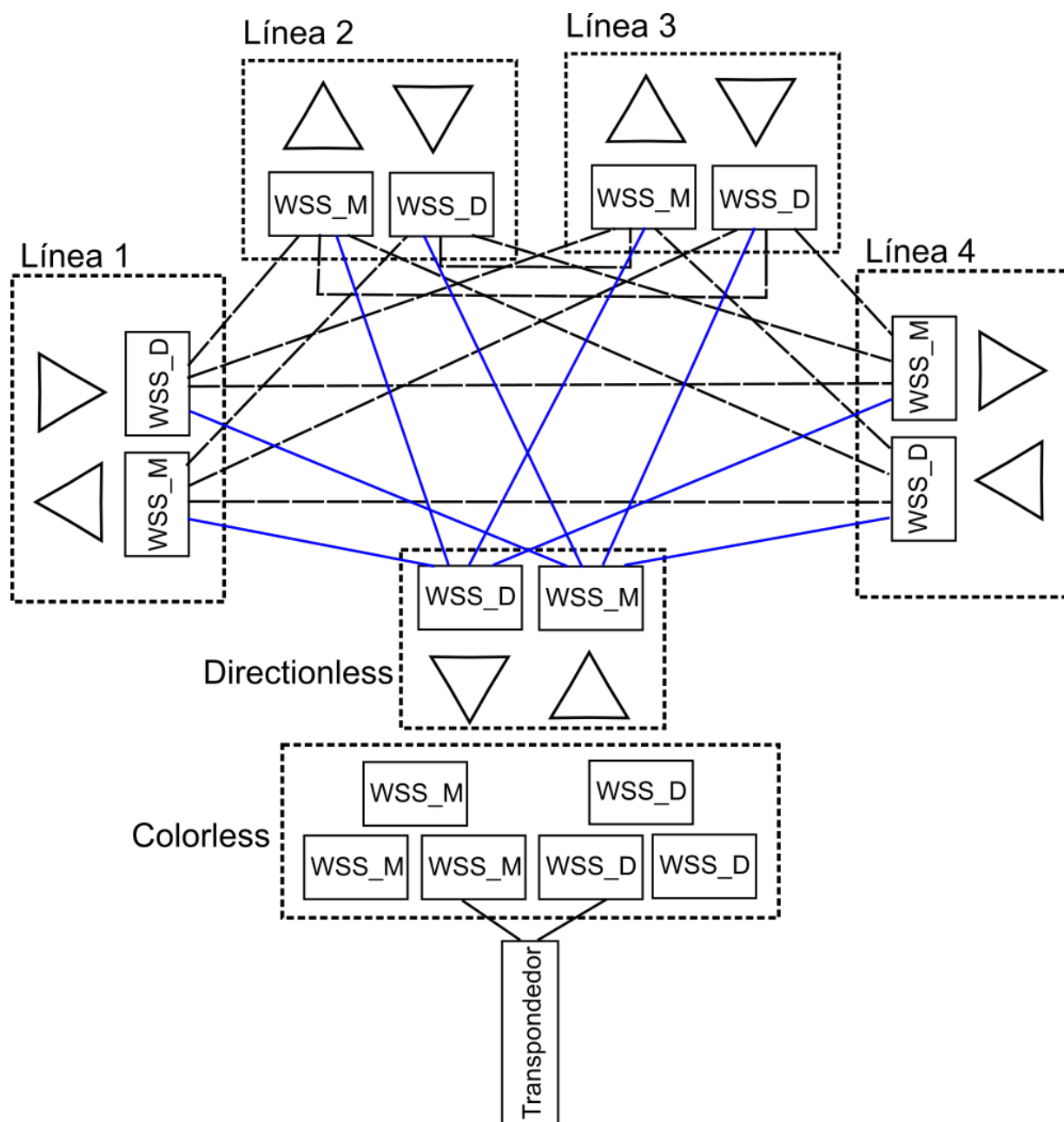


Figura 44: Solución mejorada 3.

Interfaces de Línea

Como en todas las soluciones explicadas hasta ahora, bastará con instalar tarjetas de 10G no coherentes para cubrir los requisitos del cliente.

En cuanto a la protección, se implementará exactamente igual a como se hizo en la solución mejorada 2.

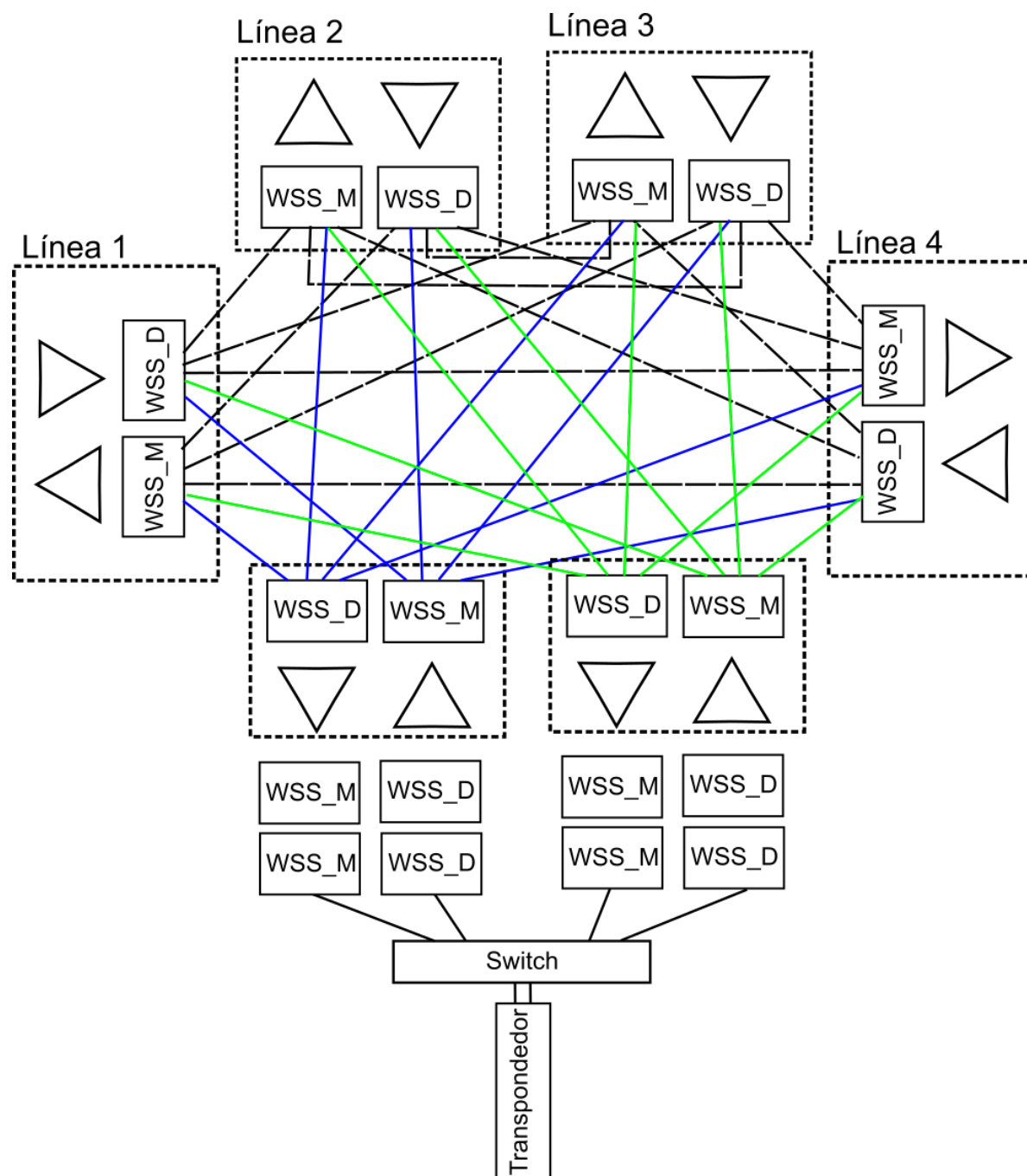


Figura 45: Solución mejorada 3 con protección.

VENTAJAS.

- La funcionalidad *colorless* permite realizar cambios de *lambdas* en canales ya desplegados de manera remota. Esta funcionalidad conlleva una gran simplificación de las tareas de operación y mantenimiento, y por tanto una gran disminución de su OPEX.

- La funcionalidad *colorless* dota al plano de control de la capacidad de cambiar de *lambda* un canal. Durante la restauración se puede llegar a dar un caso de conflicto de longitudes de onda que desemboque en un bloqueo de la restauración. Con esta funcionalidad esa posibilidad se elimina aumentando en un alto grado la supervivencia de la red.
- Como hemos explicado anteriormente, esta configuración permite la posibilidad de llegar a la configuración final de 80 canales, lo que evita hacer una gran inversión inicial que no estaría justificada con la capacidad en la red.

INCONVENIENTES.

El principal inconveniente de esta solución es el mayor coste respecto a las soluciones más simples explicadas anteriormente. Este incremento de coste es gradual ya que no es necesario equipar desde el principio todas las tarjetas WSS necesarias en la vía de línea para soportar los 40/80 canales. Estas tarjetas se pueden ir instalando según evolucionen las necesidades de tráfico en la red.

3.1.1.5. SOLUCIÓN MEJORADA 4

En esta solución se tratará otra funcionalidad de la que se habla en la RFQ como requisito valorado positivamente, **la matriz OTN**.

- R.V.5.-Para dotar de flexibilidad y optimizar la capacidad de la red, se valorará muy positivamente la provisión bajo demanda dinámica de servicios a tasas sub-*lambda* (menos de 10Gbps) de modo que todos los nodos del anillo estén equipados con matrices de crossconexión de tráfico, de forma que se puedan implantar escenarios de *traffic grooming* dentro de los contenedores OTN.

Configuración de los ROADMs:

Partiendo de la estructura que se ha utilizado hasta ahora para analizar cada una de las soluciones, se debería hablar de la configuración de los ROADMs.

Cualquiera de las configuraciones vistas hasta ahora sería válida para esta implementación, ya que la utilización de matriz OTN no tiene ninguna influencia en este aspecto.

Interfaces de Línea

Históricamente para la conexión entre equipos de cliente se han utilizado enlaces punto a punto dedicados, en los que no se tenía en cuenta la diferencia entre la capacidad requerida por el cliente y la capacidad proporcionada por la línea. Al ser líneas ópticas dedicadas se trata de soluciones de fácil implementación pero nada flexibles, que conllevan un alto desaprovechamiento de los recursos de la red (puertos, fibras, etc ...) y del ancho de banda.

La introducción de conmutadores OTN permitirá un crecimiento flexible de la red, y aumentará la utilización del ancho de banda, gracias a que permite la agrupación de

distintas tramas OTN en la misma longitud de onda. Se podrá tanto agregar distintas capacidades de tráfico como agregar servicios con distintos orígenes.

Otro de los puntos, bastante interesante para las redes actuales que están soportando un crecimiento continuo, es la escalabilidad. Las redes con matriz OTN permiten un aumento escalonado de la capacidad de la red, con lo que el cliente no necesitará hacer ni fuertes inversiones ni grandes esfuerzos en las áreas de ingeniería para adaptarse a los nuevos requisitos. Tampoco debemos olvidarnos de que actualmente ya permite el aumento de la capacidad hasta 200Gb/s y que se prevé que en breve lo haga hasta los 400Gb/s.

Con los requerimientos descritos en la RFQ, la matriz OTN a instalar sería de una matriz de 10Gb de capacidad hacia la línea (matriz-tarjeta de línea) y una capacidad de 10G hacia la tarjeta de cliente (matriz-tarjeta de cliente). La capacidad máxima requerida por este diseño será de 19 (*lambdas* de 10G de tráfico requeridas) x 10GB (capacidad de las *lambdas*) x 2(direcciones) = 380Gb/s. Esta capacidad se encuentra por debajo de la capacidad de la matriz de crossconexiones que ofrecen los fabricantes actualmente.

En cuanto al tipo de interfaces a utilizar, nos encontramos con dos posibilidades, utilizar la solución de transpondedores, muxponders explicada ya anteriormente, o utilizar la solución desacoplada.

La solución desacoplada consiste en la utilización de una tarjeta de línea y una tarjeta de cliente en combinación con las tarjetas interconectoras. La tarjeta de cliente recibe los servicios del cliente, realiza la conversión óptico-eléctrico de la señal e introduce el servicio en un contenedor ODUk. Por último, envía la señal eléctrica ODUk a la tarjeta interconectora. La tarjeta de línea se encarga de multiplexar la señal ODUk eléctrica interconectada que le llega de la tarjeta interconectora y realizar la conversión de señal óptica OTUk a *lambda* estándar.

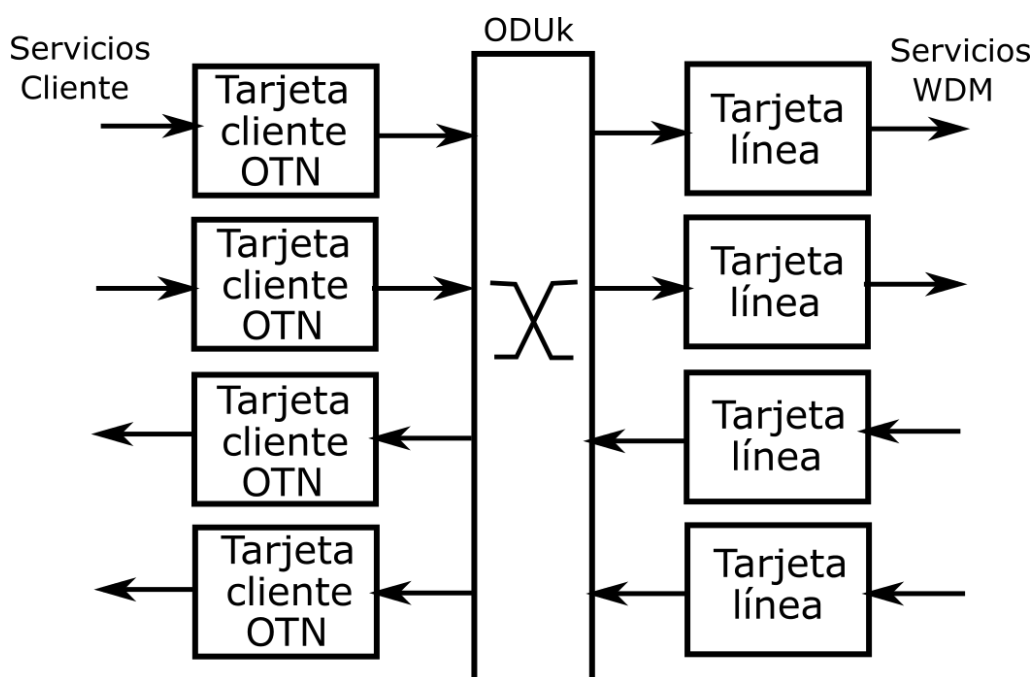


Figura 46: Solución desacoplada.

Esta configuración dota a toda la topología de una gran flexibilidad, y la posibilidad de una agrupación más fina de las señales eléctricas. Al utilizar las tarjetas interconectoras también permitirá una mejor utilización del ancho de banda.

Las capacidades de la tarjeta de línea y de cliente se podrán elegir de manera independiente la una de la otra. Al escoger la capacidad de la matriz de cliente se tendrá en cuenta la capacidad del tráfico cliente que va a agregar ese cliente, mientras que la capacidad de la tarjeta de línea dependerá de todo el tráfico soportado por ese nodo.

La utilización de la solución desacoplada posibilita la utilización de una protección que no se había podido utilizar hasta ahora, la protección SNCP (*Subnetwork Connection Protection*). Como se puede ver en la siguiente figura, en esta protección, la señal de una única tarjeta de cliente utilizando la capacidad de la matriz de interconexiones se enviará a dos tarjetas de línea distintas, cada una conectada a una dirección, de manera que el tráfico podrá llevar rutas totalmente distintas hasta llegar al destino.

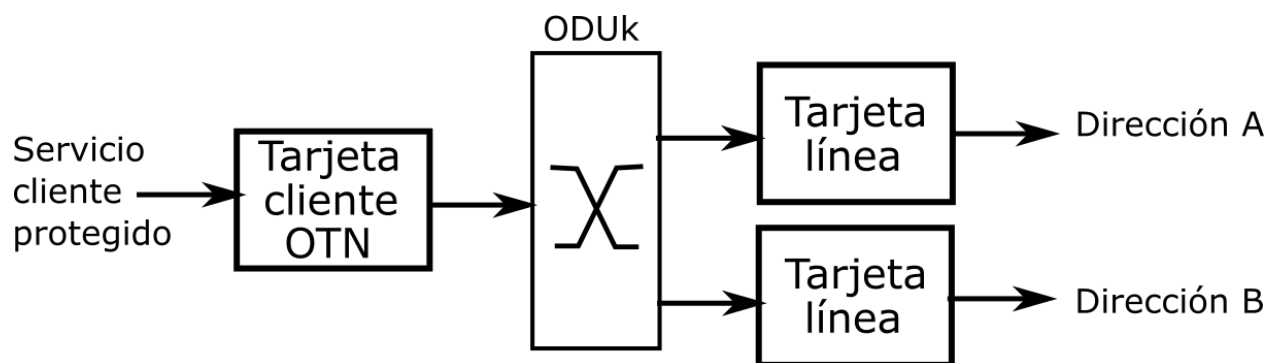


Figura 47: Protección SNCP.

VENTAJAS.

- Eficiencia en la utilización del ancho de banda, al permitir agrupar el tráfico de distintas capacidades y distinto origen en la misma *lambda*. Aprovecha mucho mejor la capacidad de la red.
- Flexibilidad en la adaptación tanto a los nuevos requerimientos de la red como a las evoluciones de la tecnología.
- Posibilidad de implementar la protección SNCP.
- Versatilidad en cuanto al tipo de plano de control que se podría implementar dependiendo de la solución elegida para los interfaces. Si se elige la solución tradicional (transpodador, muxponder) se debería implementar plano de control óptico, mientras que si se elige la solución desacoplada se podría elegir entre plano de control óptico u eléctrico.

INCONVENIENTES.

- Incremento del coste de los equipos asociado a la funcionalidad de la matriz OTN.

3.1.1.6. SOLUCIÓN MEJORADA 5

En esta solución vamos a implementar otro requisito valorable de los expuestos en la RFQ:

- R.V.7.- Se valorará positivamente el soporte de *lambdas* con señales 100G en el chasis ofertado para los nodos no finales.

Basándonos en estos requisitos, se instalarán canales **coherentes de 100G**.

Si tras hablar con el cliente y conocer las expectativas de crecimiento de red, se cree que en un futuro cercano va a ser necesaria la utilización de *lambdas* de 100G la recomendación será instalar desde un principio los canales coherentes de 100G. La ventaja de desplegar canales coherentes desde un primer momento, si se piensa que en un futuro van a ser necesarios, es que nos evitamos la instalación de los módulos DCM, que aunque podrían llegar a trabajar con ellos, su funcionamiento es óptimo cuando no están instalados en la red.

Otro punto a tener en cuenta es que el uso de canales coherentes también relaja los requisitos de los amplificadores ópticos, ya que no tendrán que compensar las pérdidas introducidas por las pérdidas de inserción de los módulos DCM.

Configuración de los ROADMs:

Esta implementación se podría aplicar sobre cualquier configuración de ROADMs explicada en los puntos anteriores.

Interfaces de línea

Sería interesante implementar esta solución junto con una matriz OTN y así implementar la solución desacoplada explicada en la propuesta de solución anterior, combinando la utilización de tarjetas de interfaces de línea con tarjetas tributarias de cliente.

VENTAJAS.

- Al instalar tarjetas no coherentes desde un primer momento no sería necesario instalar módulos de dispersión cromática.
- Al dimensionar la red a una capacidad mayor de la requerida actualmente, una vez hecha la inversión inicial la red quedaría preparada por bastante tiempo para asumir el aumento de capacidades requerido.

INCONVENIENTES.

- Coste de la solución respecto al aprovechamiento que se podrá hacer de esta. Por las necesidades de tráfico expuestas y teniendo en cuenta el crecimiento que se presupone a este tipo de redes, se considera que durante un largo periodo de tiempo los recursos estarán infrautilizados.

4. Implementación de la Red Regional de Ciencia y Tecnología de Castilla y León

Como solución final, de entre las explicadas en el apartado anterior, se va a elegir la configuración *directionless* con matriz OTN.

La solución *directionless* ha sido seleccionada para poder habilitar el plano de control, y por tanto dotar al sistema de más posibilidades de restauración en caso de que aparezca algún problema en la red. En cambio se ha decidido desestimar la configuración *colorless* ya que, con la matriz de tráfico expuesta, las ventajas adicionales que aportan a la configuración *directionless* no serían aprovechadas en su totalidad.

Por otro lado, y como se ha explicado anteriormente, el uso de la matriz OTN dota de una gran flexibilidad al sistema y permite aprovechar de una manera más eficiente el ancho de banda del sistema. Por todo ello, se ha considerado que sería muy útil su utilización en esta solución.

En la configuración explicada a continuación, usando los equipos del suministrador elegido (Ciena), se van a intentar cumplir todos los requisitos obligatorios explicados en la RFQ y aquellos requisitos valorados positivamente que se consideren más adecuados para el diseño de la red que nos ocupa.

Para afrontar la explicación de las características técnicas de esta solución se va a seguir el mismo formato que el cliente ha seguido para organizar la RFQ. Primero se explicarán los requisitos del equipamiento óptico, para más tarde afrontar los requerimientos del sistema de gestión.

4.1. Ciena y la familia de equipos 6500

Ciena Corporation es un proveedor de equipos de telecomunicaciones con sede en Estados Unidos, que se dedica al suministro tanto de los equipos como del software necesario para desplegar redes ópticas de telecomunicaciones que permitan el transporte de servicios de datos, voz y video.

Sus productos se utilizan tanto en redes de proveedores de servicios de telecomunicaciones, como en redes privadas de empresas. La empresa fue fundada en 1992 y tiene su sede en Hanover, Maryland.

Ciena divide sus productos en diferentes familias pertenecientes a las distintas tecnologías: conmutación de paquetes, transporte óptico, etc. El producto que se utilizará para la implementación de esta red, recibe el nombre de 6500.

Los equipos 6500 ofrecen una amplia gama de configuraciones ROADM que utilizadas en combinación con Redes Ópticas de Transporte (OTN), protocolos de conmutación de paquetes y un plano de control inteligente, consiguen maximizar la eficiencia en la utilización del ancho de banda y la flexibilidad a lo largo de toda la red.

Esta familia de equipos también está dotada de las herramientas y la inteligencia necesaria para automatizar y simplificar las operaciones de creación, gestión y mantenimiento que se deben llevar a cabo para administrar la red de una manera adecuada, reduciendo en gran medida los costes operacionales.

Parte de la gran flexibilidad de la que están dotados estos equipos viene dada por la gran variedad de servicios que puede transportar: Ethernet, OTN, SDH/SONET, video y servicios DWDM transparente. Otra ventaja de estos equipos, es la capacidad que soportan. La misma red puede adaptarse de una manera eficiente para llevar capacidades desde lo 2.5G a los 200G o superior en 50 GHz.

También cabe destacar que Ciena siempre ha estado involucrada en distintos foros y organizaciones responsables de desarrollar los estándares de la tecnología, como el *Optical Internetworking Forum* y la ITU. A la hora de implementar sus equipos siempre ha respetado estas recomendaciones, con lo que la interoperabilidad de estos equipos con los de otros suministradores está garantizada.

Existen 4 chasis disponibles 6500-2, 6500-7, 6500-14, and 6500-32, que se podrán utilizar dependiendo de la configuración que se debe implementar en cada emplazamiento concreto.



Figura 48: 6500-2 utilizado para implementar un amplificador [18].



Figura 49: 6500-7 utilizado para implementar un ROADM [18]



Figura 50: 6500-14 utilizado para implementar un ROADM [18]



Figura 51: 6500-32 utilizado para permitir la conmutación de paquetes y OTN [18]

La familia 6500 ofrece todo el rango de arquitecturas fotónicas en una única plataforma, desde filtros fijos pasivos a soluciones *directionless*, *colorless* o *contentionless* incluyendo soluciones coherentes; todo ello para poder enviar cualquier servicio de cualquier lugar de la red de una manera dinámica.

El diseño de la solución coherente de Ciena incluye la utilización de *Soft-Decision Forward Error Correction* (SD-FEC) como técnica de corrección de errores, y procesadores de señal digital (DSP) robustos tanto en el receptor como en el transmisor. Estos procesadores dotan al sistema de una mayor eficiencia espectral, lo que es una gran ventaja cuando la señal debe atravesar en cascada varios filtros o sistemas OADM. Todas estas innovaciones hacen de la solución de Ciena una de las soluciones líderes del mercado, permite el transporte de señales de 100G a distancias más largas con un pequeño número de regeneradores. Esta solución también está dotada de una tolerancia

a la dispersión mayor, que permite la utilización de fibras antiguas con el consiguiente ahorro de coste al no tener que reemplazarlas.

Otra ventaja única de utilizar estos equipos es la funcionalidad *PinPoint Advanced Fiber Analytics* que proporciona una visibilidad, hasta ahora impensable, del estado de la planta de fibra. Permite localizar e identificar rápidamente desde altas pérdidas de un conector hasta reflexiones en la fibra integrando OTDR en los puertos de recepción de los amplificadores de línea, haciendo más fácil para el operador el conseguir un comportamiento óptimo de la planta de fibra.

La familia 6500 posibilita tanto la utilización de la tecnología OTN como de la conmutación de paquetes, permitiendo conmutaciones del orden de Terabits y la utilización de servicios multiprotocolo. El operador podrá elegir modelo de red que más se aproxime a sus necesidades. Los equipos tendrán distintos modos de trabajo, pudiendo funcionar completamente como conmutadores OTN, de paquetes, o mixto. Esta variedad hace que los interfaces soporten una gran cantidad de protocolos lo que se traduce en una rápida respuesta a las necesidades del cliente.

Los equipos 6500 soportan el mapeado *ODUflex*. Esto permite ajustar los contenedores de ancho de banda de 1G a 100G en incrementos de 1.25G. La agrupación de *lambdas* parciales y los puertos de GbE/10GbE/100GbE aseguran una utilización del ancho de banda y un transporte más eficiente del tráfico. La conmutación OTN permite el transporte transparente de todo tipo de servicios a lo largo de toda la red.

Otro aspecto muy importante en estas redes es el plano de control. El desarrollado por Ciena recibe el nombre de **OneConnect**. Este plano de control distribuido permite a las redes de transporte automatizar y distribuir muchas de las funciones que se llevaban a cabo de una manera centralizada y manual. Algunas de las ventajas más importantes que aporta son:

- Utiliza la topología de la red en tiempo real para proporcionar información precisa del estado de los equipos y de los recursos de ancho de banda disponibles.
- Utiliza la señalización para permitir llevar a cabo la creación de servicios de una forma más rápida.
- Permite la utilización de distintos tipos de SLAs gracias a la combinación de distintos tipos de protecciones y distintas opciones de restauración.

Ciena ha implementado tanto la opción óptica (*level 0-control plane*) como la eléctrica (*level 1- control plane*), permitiendo a los clientes que implementen aquella que les resulte más ventajosa de acuerdo a las características de su red.

Otro punto muy importante a valorar a la hora de seleccionar una red es el sistema de gestión, ya que es el interfaz que diariamente utilizará el cliente, dependiendo de su calidad y de las distintas opciones que presente al cliente el que se pueda hacer una gestión adecuada de la red. El sistema de gestión de Ciena para estos equipos recibe el nombre de **OneControl**.

Otra herramienta muy útil para este tipo de redes son los planificadores de red. En el caso de Ciena recibe el nombre de **OnePlanner**. Se trata de una herramienta de diseño y optimización multinivel que aprovecha la amplia experiencia de Ciena en la simulación y planificación del plano de control de nivel 1, del diseño de los sistemas fotónicos y del desarrollo de interfaces gráficas para desarrollar una plataforma completa y fácil de usar. OnePlanner correlaciona datos de diferentes capas de la red, permitiendo que el planificador pueda ver fácilmente la relación entre los servicios, instalaciones y equipos.

4.2. Equipamiento Óptico

4.2.1. Arquitectura de los ROADMs

Comenzaremos por la parte referente a la implementación de los ROADMs. Son cuatro las recomendaciones que aparecen en la RFQ en ese aspecto:

R.O.7.--- El equipamiento de un nodo soportará la conexión de al menos las vías indicadas en la Tabla 1, para la inserción/extracción de canales, de forma que cualquiera de las lambdas que llegan por una de las vías pueda bien bajarse o extraerse en local (o insertarse), bien dejarse en paso a otra cualquiera de las vías no locales. Lo que implica que los nodos sean mínimo ROADMs básicos direccionales y coloreados.

R.V.2.--- Para los nodos con dos o más vías de línea se valorará que el tráfico local enrutado inicialmente por una determinada vía de línea, pueda ser reenrutado o conmutado a cualquiera de las otras vías del nodo, sin intervención local de un técnico.

R.V 4.---Se valorará que el equipamiento propuesto para las vías locales de los ROADM, soporte conversiones de color en los canales ópticos, extremo a extremo, (para más de 8 canales ópticos), de forma automática para evitar bloqueo de lambdas.

R.V.6.- Se valorará positivamente que el equipamiento propuesto permita equipar como mínimo dos vías de tráfico local directionless para el caso que se decida en el futuro dotar de mayor robustez al sistema en servicios con protección de canal óptico. La incorporación de una nueva vía de tráfico local directionless se debería realizar sin cambio del hardware ya desplegado y sin afectar al tráfico en servicio a través de otras vías locales.

Los requisitos obligatorios explicados en la RFQ solamente establecen que la red debe ser direccional y coloreada, dejando en mano del suministrador el implementar si así lo ve oportuno una solución *directionless* con una o varias vías locales, y/o la solución *colorless*.

Se ha desestimado llevar a cabo la configuración direccional debido a la imposibilidad de implementar una red con plano de control basada en ella, como se pretende que sea esta. En las redes direccionales, una determinada longitud de onda sólo puede ser enviada hacia/desde una determinada dirección, siendo necesaria la reconexión de fibras ópticas in situ cuando esta dirección se quiere modificar. Por tanto, se ha optado por la

configuración *directionless*, en la que una determinada longitud de onda podrá ser enviada a/desde cualquier dirección. Para redes ASON, la funcionalidad de reenrutado encontrará de manera automática el camino a seguir y creará las interconexiones ópticas que lo establezcan.

En cuanto al número de vías locales, se ha decidido dotar el diseño con dos vías locales por las múltiples posibilidades en términos de protección y restauración.

Por otro lado, se ha dispuesto no implementar la funcionalidad adicional *colorless*. Esta funcionalidad permite que cualquier longitud de onda pueda ser insertada/extraída en cualquier puerto. Aunque las ventajas que aporta son muchas, para matrices de tráfico tan poco exigentes como la de esta RFQ, el sobrecoste que implica no quedaría justificado.

Para implementar la solución *directionless* en el caso más complejo de los solicitados, 4 vías, necesitamos 6 tarjetas WSS. Cuatro se utilizarían para el tráfico de cada una de las direcciones y otras dos para implementar las vías locales, como se puede ver en la Figura 1. De las WSS disponibles hasta ahora, bastará con utilizar las tarjetas WSS de 5x1 puertos, como se puede ver en la Figura 52, cada una de las tarjetas WSS está asociada a una tarjeta MLA que compensar las pérdidas de inserción de las tarjetas WSS.

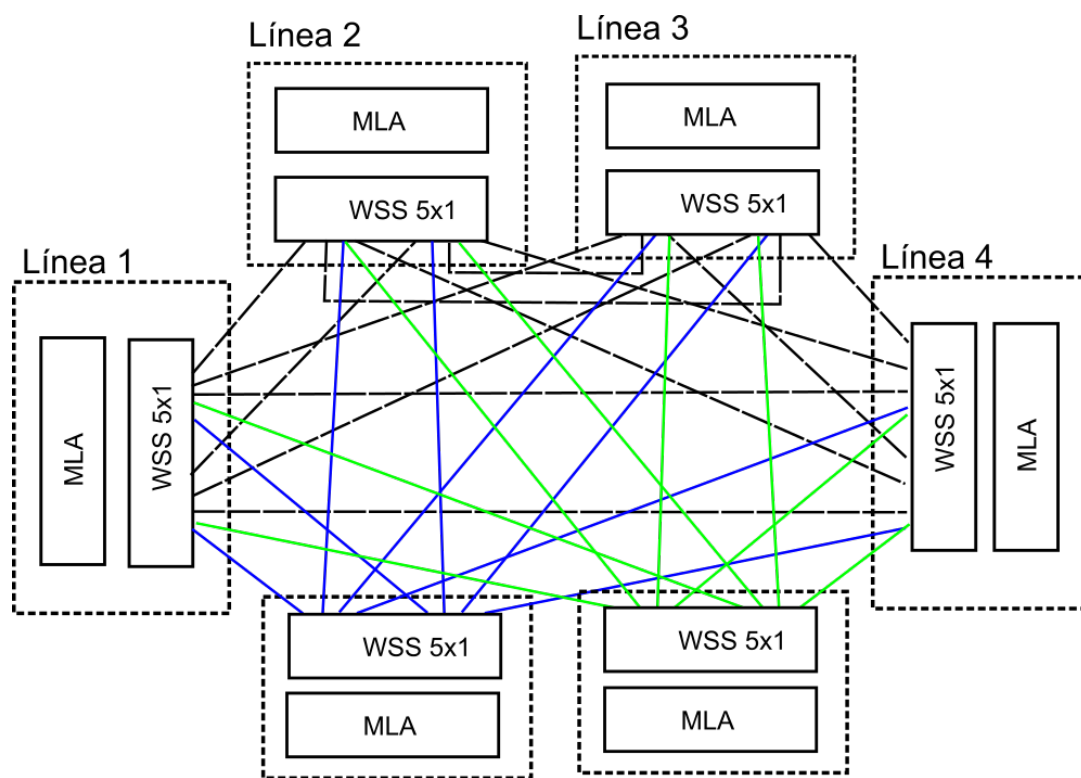


Figura 52: ROADM *directionless* de 4 vías implementado con tarjetas de Ciena

Las tarjetas WSS son uno de los componentes de los módulos multiplexores ópticos reconfigurables de extracción- inserción. Se usan junto con los multiplexadores/demultiplexadores para llevar a cabo la agrupación de las longitudes de onda. Permiten reenviar la señal que les llega del camino principal por el resto de puertos, así como reenviar las longitudes de onda introducidas localmente a cualquier puerto. Existen distintos tipos de tarjetas WSS: 2x1, 4x1, 5x1 y 9x1.

Los nodos para los que el cliente solicita que seancap aces de soportar la implementación de 4 vías son: ULE, USAL, UVA, UBU.

En cuanto a la implementación de nodos con 3 y 2 vías, se seguiría el mismo patrón, pero utilizando solamente los puertos de las tarjetas WSS que sean necesarias.

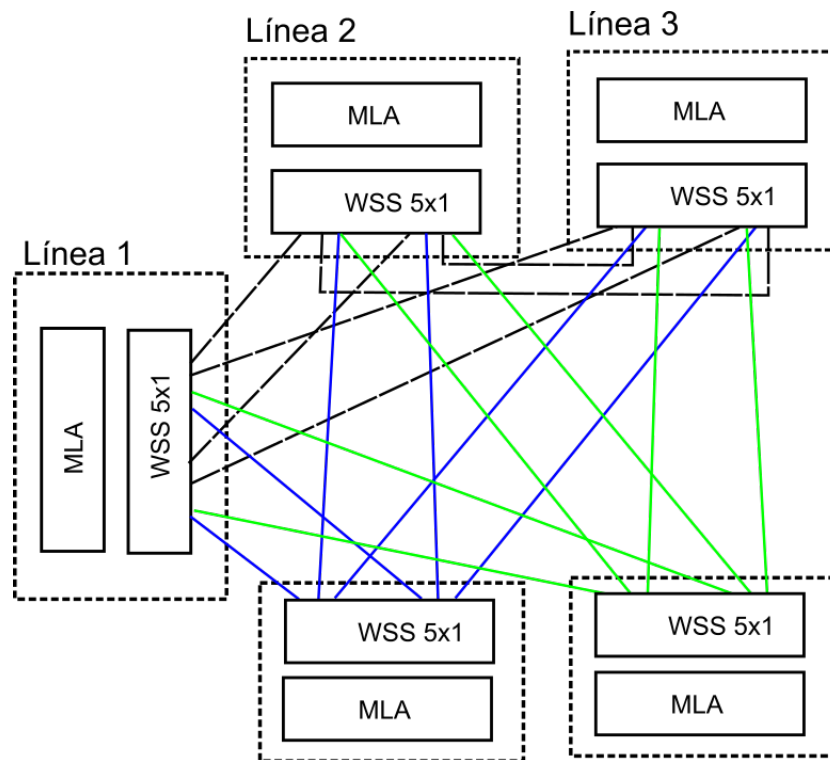


Figura 53: ROADM *directionless* de 3 vías implementado con tarjetas de Ciena

Esta solución de 3 vías se implementará en UVASG.

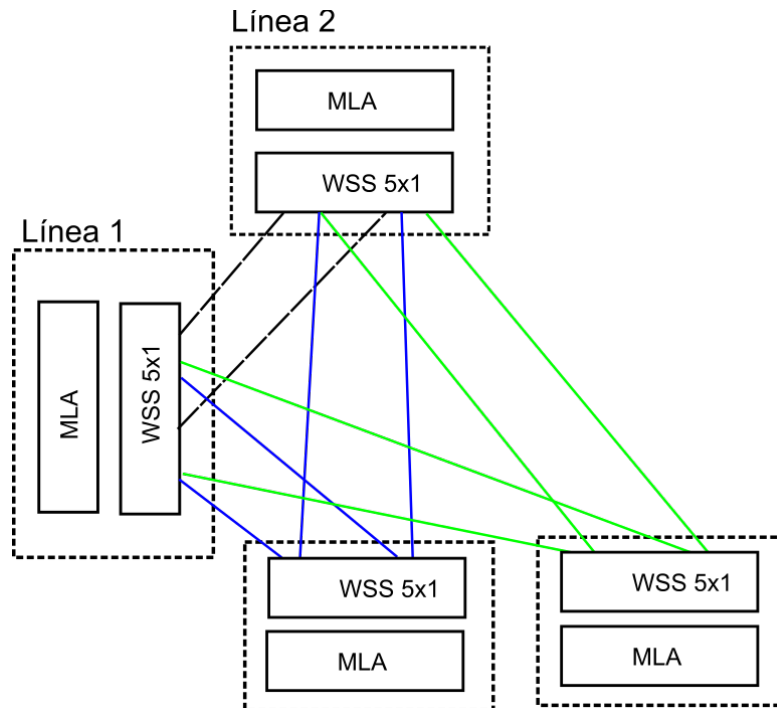


Figura 54: ROADM *directionless* de 2 vías implementado con tarjetas de Ciena

Esta solución de 2 vías se implementará en USALZA, USALAV y UVAPA.

En cuanto a los ROADM de grado 1, no tiene sentido llevar a cabo una configuración *directionless* ya que únicamente se puede enviar el tráfico en una dirección, por tanto se implementará una solución direccional.

La vía hacia/desde la que se enviará/recibirá el tráfico se configurará con una tarjeta WSS de 5x1 puertos como el resto, pero la vía de inserción/extracción local que configurará con una tarjeta CDM44 que actúa como tarjeta multiplexadora/demultiplexadora de 44 puertos.

Existe una solución más barata que consistiría en utilizar WSS de 2x1 puertos. Se ha optado por la utilización de WSS de 5x1 puertos de cara a un futuro crecimiento de la red, ya que estas tarjetas permitirían la implementación de la solución *directionless* si fuese necesario.

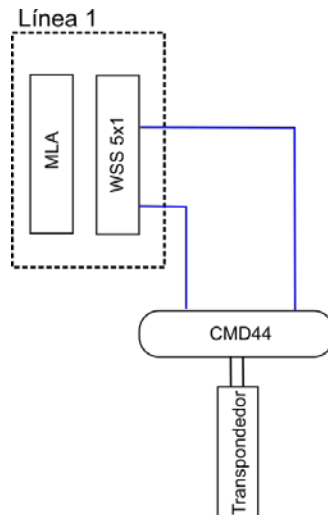


Figura 55: ROADM direccional de grado 1 implementado con tarjetas de Ciena.

Esta solución se implementará en ULEPO, USALBE y UVASO.

4.2.2. Número de Canales

Una vez implementada la parte de los ROADMS, nos fijaremos en el número de *lambdas* que debe ser capaz de soportar el diseño. Son tres las recomendaciones que se refieren a ese aspecto:

R.O.1.- El sistema ofertado deberá tener una capacidad mínima de 40 lambdas de 10Gb/s en cada una de las secciones ópticas de la red. Dicho crecimiento se debe ofrecer de forma no intrusiva (sin cortes de tráfico sobre los servicios ya existentes) .Se garantiza de esta forma un crecimiento futuro, de forma no traumática.

R.O.2.--- Para los nodos que no forman parte del anillo (BÉJAR, PONFERRADA, SORIA) y dado el tráfico que se prevé en el futuro, se podrá optar si se considera, por un equipamiento con una capacidad mínima de 16 lambdas de 10Gb/s.

R.V.3. ---Se valorará que el sistema ofertado tenga una capacidad de crecimiento de 80 o más lambdas de 10Gb/s (Banda C, rejilla de 50GHz) sin que implique cambio de hardware ni afecte a los canales en servicio.

Tras analizar las recomendaciones, y teniendo en cuenta las matrices de tráfico actuales, se implementará en un primer lugar la solución de 40 *lambdas* para todos los nodos que forman parte del anillo, dejando pendiente llegar a la solución de 80 *lambdas* cuando la demanda del tráfico crezca. Aunque este sea un trabajo a futuro, se debe tener presente desde el principio, ya que una de las peticiones de la RFQ es que esta ampliación se haga de forma no intrusiva con el tráfico ya desplegado.

En cuanto a los equipos para los que se ha especificado que se puede optar por una configuración de 16 *lambdas*, se explicarán las dos distintas soluciones explicándose cual es la más adecuada para esta red.

Como se explicó en la solución general, existen dos posibilidades, o bien utilizar tarjetas WSS de mayor capacidad, o bien, utilizar un filtro que mezcle la señal proveniente de las distintas multiplexoras/demultiplexoras.

Antes de describir la solución, se debe explicar un concepto utilizado por Ciena: las bandas azul y roja. Ciena divide la banda C en dos, llamando banda roja a las longitudes de onda que se encuentran en torno a los 1560nm y banda azul a las que se encuentran en torno a los 1530nm.

La primera de las posibilidades para llegar a los 80 canales será implementar los ROADMs con tarjetas WSS de 9 puertos en la vía local. Las tarjetas de WSS de 9x1 puertos están diseñadas de tal manera que de los 9 puertos disponibles, 7 se usan para conexiones en paso quedando dos libres para hacer inserción/extracción de las *lambdas*, uno para la banda roja y otra para la banda azul.

A estos dos puertos irán conectadas dos tarjetas CMD44, multiplexadoras y demultiplexadoras de 44 puertos, una será la CMD44_azul y la otra, la CMD44_roja. Por último, los transpondedores se conectarán directamente a las tarjetas CMD44.

Las tarjetas CMD llevan a cabo las funciones de multiplexación y demultiplexación en la misma tarjeta, permitiendo multiplexar los canales que recibe en un único canal que cumple las recomendaciones de la ITU, a la vez que también permite demultiplexar un único canal en varios. Existen distintos tipos de tarjetas CMD dependiendo del número de canales que gestione. La tarjeta CMD44, gestiona 44 canales, y la tarjeta CMD12, que gestiona 12 canales.

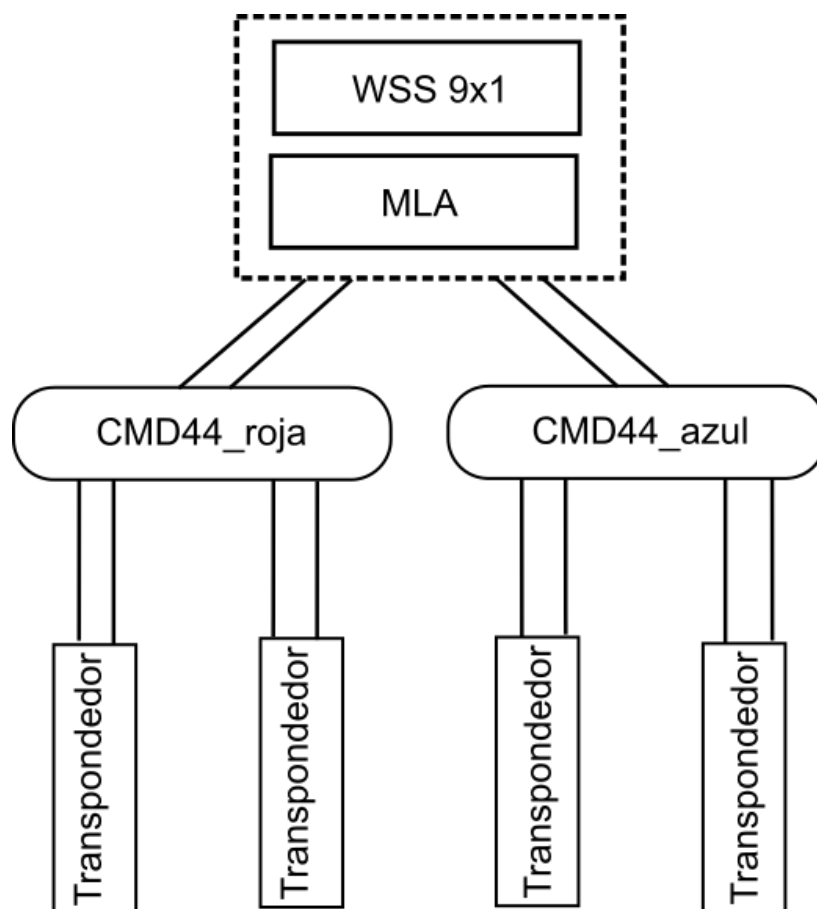


Figura 56: Solución de 88 lambdas con WSS9x1

La segunda solución, permitiría conservar las tarjetas WSS de 4 puertos necesarias para la solución *directionless*. Tras las dos tarjetas CMD44 a las que van unidos los transpondedores, se instalará una tarjeta BMD2 conectada directamente a la WSS.

Las tarjetas BMD2 actúan como acopladores que permitirán mezclar la señal que llega de la CMD44_azul con la señal que llega de la CMD44_roja, llegando así a una solución con 88 lambdas.

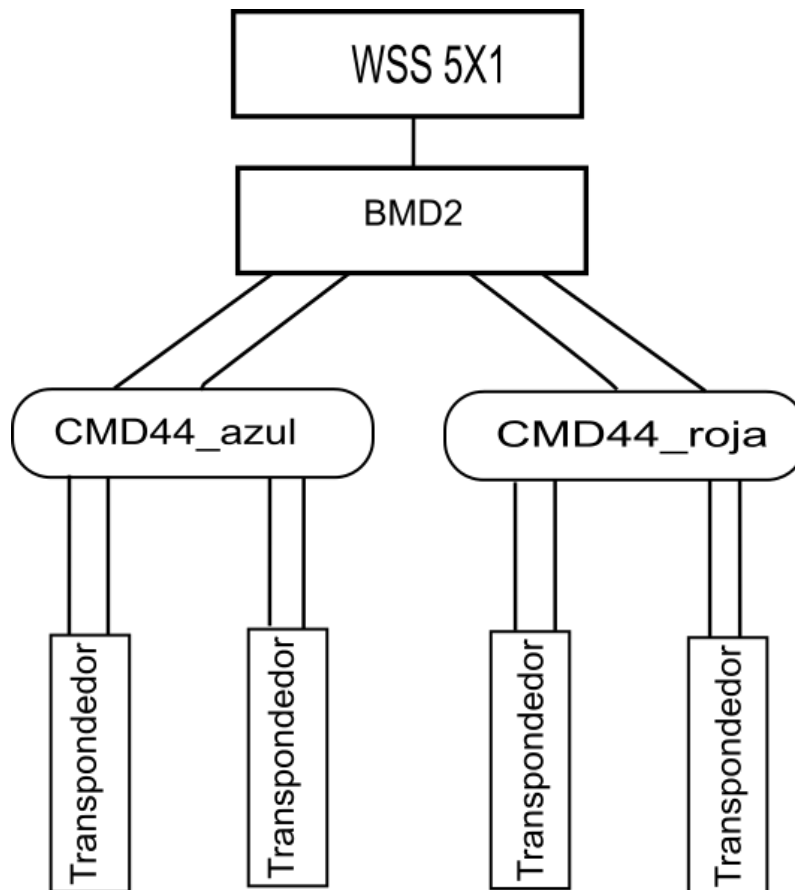


Figura 57: Solución de 88 lambdas con BMD2

Se ha decidido implementar la segunda solución (BMD2+CMD44), ya que el precio de estas tarjetas es menor que el de las tarjetas WSS y, por tanto, conseguiremos llegar a la misma solución con una menor inversión.

Por otro lado, esta implementación permite llevar a cabo la evolución de una forma progresiva. En un principio para conseguir la solución de 44 lambdas, se instalarán la tarjeta BMD2 y la tarjeta CMD44_azul, no teniendo que instalarse la CMD44_roja hasta que los requerimientos de tráfico hagan necesario llegar a la solución final de 88 lambdas. En cambio, si se hubiese elegido la solución de las WSS, se habría tenido que instalar WSS's de mayor capacidad aunque las matrices de tráfico actuales no lo requieran.

En cuanto a la implementación en los equipos, excepto para aquellos en los que se pueden implementar una solución más básica de 16 *lambdas*, se va a implementar la

solución de 40 *lambdas*, agrupando todo el tráfico en torno a la banda azul. La BMD2 se dejará ya instalada para que la implementación de la solución de 80 *lambdas* no afecte el servicio.

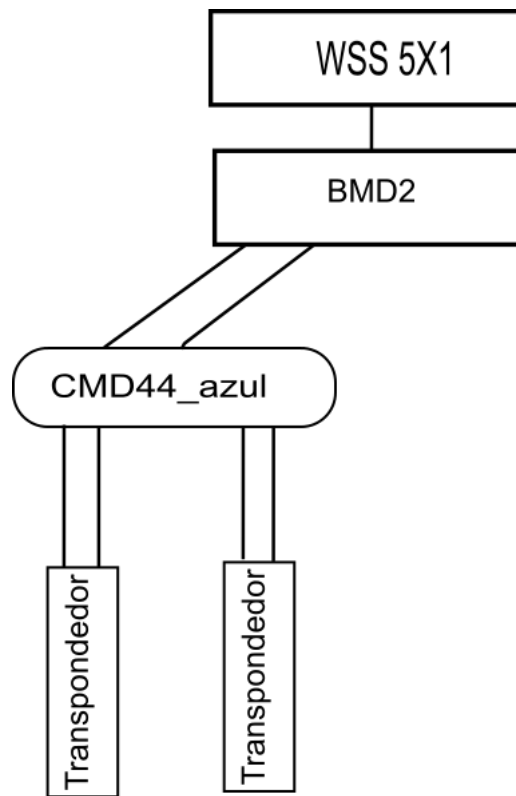


Figura 58: Solución de 16 *lambdas* con CMD44

Para implementar la solución de 16 *lambdas* solicitada para los equipos con menos tráfico existen dos distintas posibilidades.

Por un lado se podría usar como se ha explicado para la solución de 40 *lambdas*, una única tarjeta CMD44 que tiene la capacidad de multiplexar/demultiplexar 44 *lambdas* para la que en este caso no se utilizaría toda su capacidad.

Por otro lado, se podrían utilizar dos tarjetas CMD12 que multiplexan/demultiplexan 12 *lambdas* conectadas a una tarjeta SMD.

La tarjeta SMD es una multiplexadora/demultiplexadora de 8 puertos, que en esta ocasión se usará para multiplexar/demultiplexar la señal proveniente de las dos tarjetas CMD12, consiguiendo así llegar a las 16 *lambdas* requeridas.

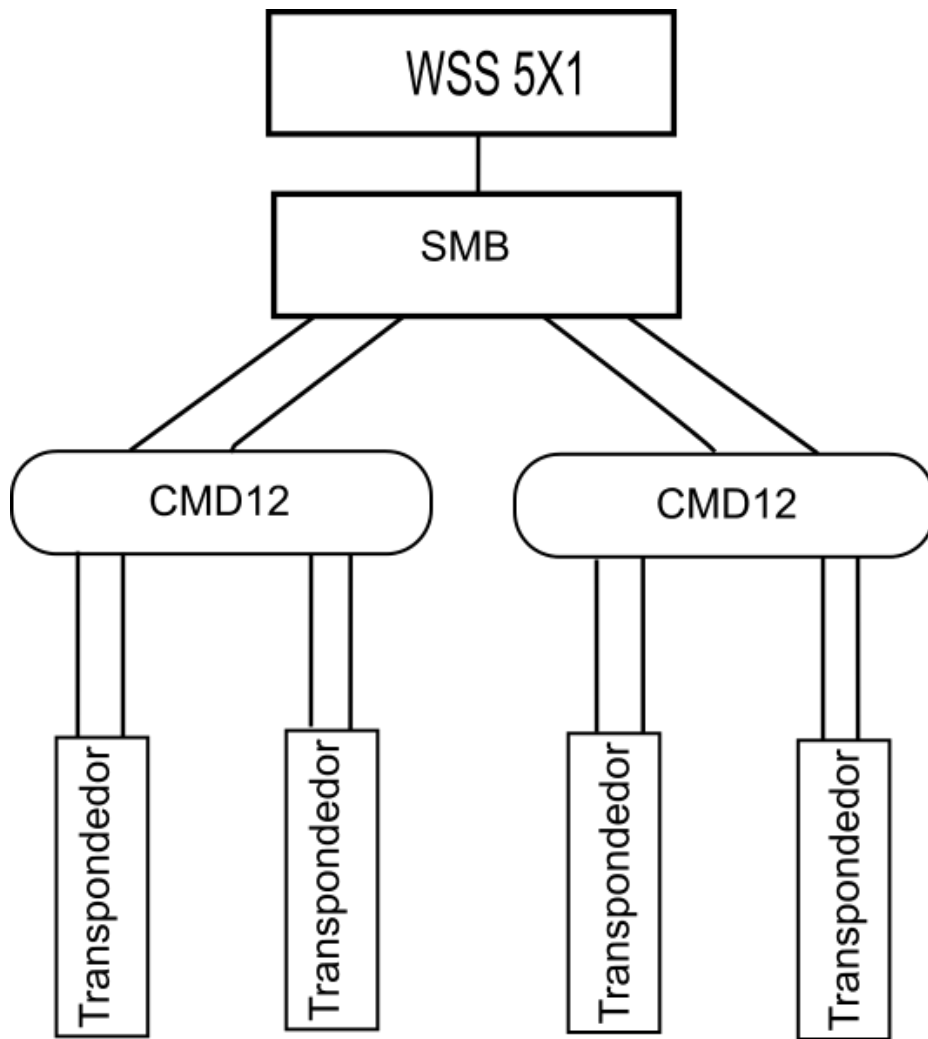


Figura 59: Solución de 16 lambdas con CMD12

Finalmente, se ha decidido implementar la solución que utiliza la tarjeta CMD44 por ser la más simple, teniendo un coste parecido a la otra configuración explicada. Al tener que utilizar dos tarjetas más (CMD12 y SMD), el coste adicional que representa la CMD44 respecto a la tarjeta CMD12 desaparece.

4.2.3. Transpondedores

Continuaremos con los transpondedores a utilizar para responder a las necesidades de tráfico explicadas en la RFQ. Los requerimientos referentes al tipo de tráfico a soportar indican que:

R.O.4.--- Todos los transponders y muxponders del equipo deberán estar equipados con láseres sintonizables.

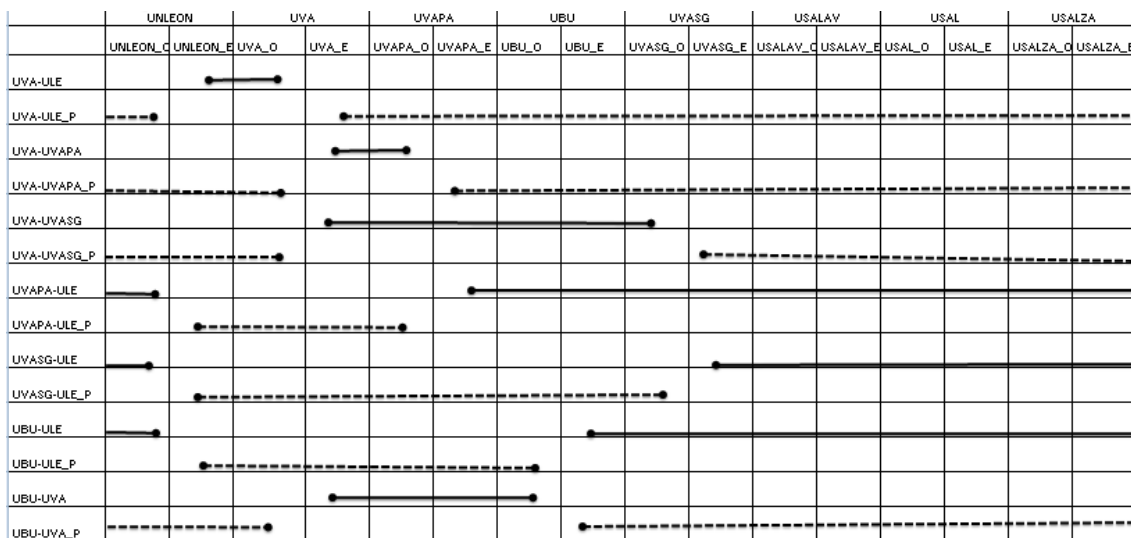
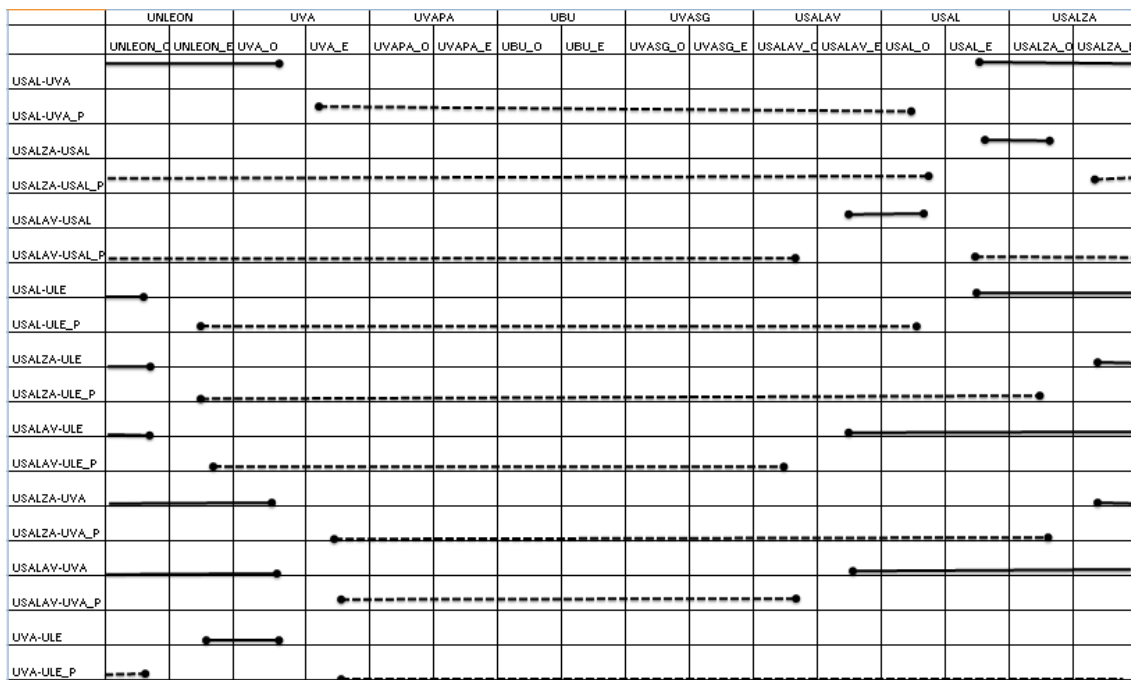
R.O.8.---Interfaces clientes soportados: 10GbE LAN-PHY/WAN-PHY; 1 GbE; 4G FC, 8GB FC y 10G FC

R.O.9.--- Soporte de puertos clientes OTN según define la norma ITU-T G.709: OTU-1, OTU-2.

R.V.5.---Para dotar de flexibilidad y optimizar la capacidad de la red, se valorará muy positivamente la provisión bajo demanda dinámica de servicios a tasas sub-lambda (menos de 10Gbps) de modo que todos los nodos del anillo estén equipados con matrices de crossconexión de tráfico, de forma que se puedan implantar escenarios de traffic grooming dentro de los contenedores OTN.

Las necesidades de tráfico indicadas en la RFQ son las siguientes, indicadas en las Figuras 60 y 61.

1. Tráfico de 10G



[illegible]

Figura 60: Matriz de tráfico de 10G (a, b y c)

Tráfico de 1G

[illegible]

[illegible]

Figura 61: Matriz de tráfico 1G (a y b)

En cuanto a la implementación, se utilizarán dos soluciones distintas: una para el tráfico de 10G y otra distinta para el tráfico de 1G.

El tráfico de 10G se implementará con la tarjeta OTR. Esta tarjeta es un transpondedor que permite introducir un canal de 10Gb/s en una señal OTU2 o OTU2e, y lleva a cabo la conversión entre señales de cliente de 10Gb/s y señales WDM cumpliendo con las recomendaciones de la ITU-T.

La solución para el tráfico de 1Gb se implementará siguiendo la solución desacoplada explicada en la descripción general. Para el lado de cliente utilizaremos la tarjeta MOTR con 8 puertos GE, y para el lado de línea utilizaremos la tarjeta WL1. La tarjeta interconectora que las une será la XC, que sólo será necesaria en el caso de que no se encuentren en *slots* adyacentes.

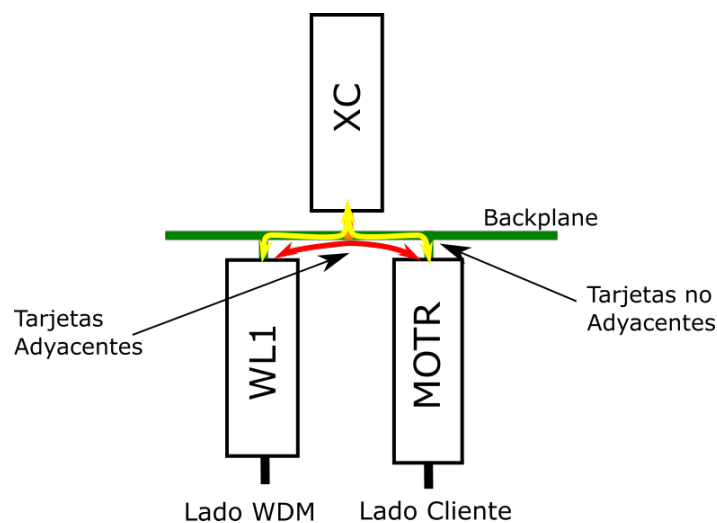


Figura 62: Configuración tráfico de 1G.

Una de las características de la tarjeta WL1 es que compensa la dispersión cromática de forma eléctrica, por lo que no sería necesaria la instalación de módulos DCM adicionales. De tal manera que quedaría también cubierto el requerimiento:

R.O.3.--- La compensación de la dispersión cromática debe realizarse en el mismo chasis/rack, cubriendo toda la banda C.

Como requisito valorado positivamente es que la estructura sea capaz de soportar 100G:

R.V.7.--- Se valorará positivamente el soporte de lambdas con señales 100G en el chasis ofertado para los nodos no finales.

Para la solución de 100G utilizaremos la tarjeta WL3. Se trata de una tarjeta de línea de 100G, que tiene una única interconexión ODU4 con la tarjeta insertada en el *slot* contiguo. La solución variará en función de la tarjeta que se elija para insertar en este *slot*.

Son dos las soluciones posibles. La primera de ellas consiste en insertar tarjetas “10x10G” o “10x10G multi” la primera usada para clientes 10GE y la segunda para cualquier señal 10G, que permitirá multiplexar las señales de 10G en una única señal de 100G que se insertará en la WL3 y que se convertirá en una señal ODU4.

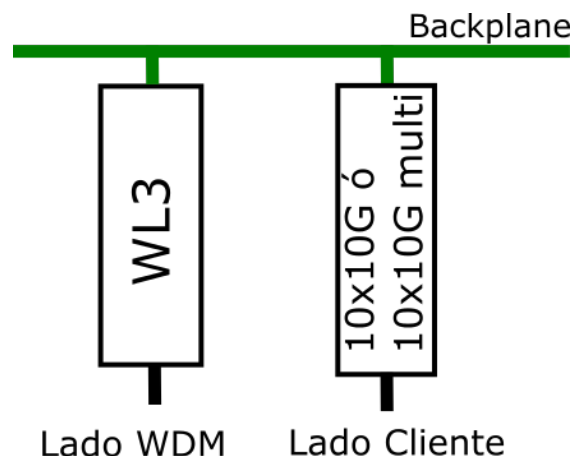


Figura 63: Solución tráfico de 100G con tarjetas 10x10G ó 10x10G multi

La segunda consiste en insertar tarjeta mini-crossconectora llamada XC I/F (*crossconnect interface*) que permite asignar cualquiera de los 80 ODU0 de la trama ODU4 a cualquier flujo de tráfico que se quiera. Este tráfico pasará también por la interconectora general del chasis, la tarjeta XC.

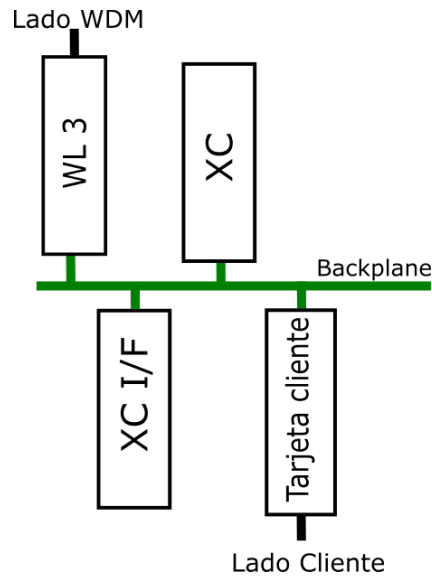


Figura 64: Solución tráfico de 100G con XC I/F.

4.2.4. Protecciones

En cuanto a las protecciones solicitadas:

R.O.10.--- El equipo debe soportar e implementar mecanismos de protección frente a caída física de circuitos (protección 1+1). La protección se hará en la capa óptica (a nivel de canal óptico, OCh).

Esta protección 1+1 a nivel de capa óptica se implementará usando hardware adicional que divida la señal OCh a la salida de los transpondedores/muxponders: la tarjeta OPS. La tarjeta OPS funciona como un divisor de la señal óptica. Envía la misma señal OCh por dos vías distintas, dos caminos distintos hasta su destino. En la recepción se encargará de seleccionar uno de los canales que recibe. En caso de fallo del canal que está en funcionamiento, seleccionará el canal de la ruta de protección.

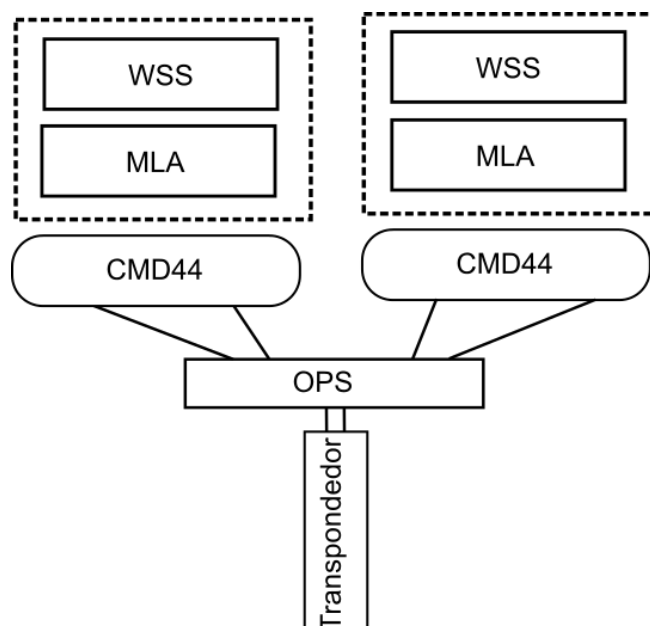


Figura 65: Protección 1+1 capa óptica

4.3. Requisitos del Plano de Control

R.V.9.--- Se valorará que la solución presentada a nivel de gestión incluya plano de control, preferiblemente GMPLS, de modo que funcionalidades tales como la restauración de canales esté soportada y esté totalmente operativa a nivel de hardware/software y licencias. Por tanto sólo se valorará si incluye también aquellas funcionalidades que sean necesarias o de las que dependa para su funcionamiento. (ej. directionless, colorless).

Como se ha explicado, son varias las ventajas que aporta la utilización del plano de control en una red de transporte:

Las funcionalidades básicas de este plano de control son:

- **Descubrimiento automático de los recursos de la red.** Permite tener en todo momento una imagen precisa de la topología de la red y de los recursos disponibles
- **Aprovisionamiento automático.** Aumenta la velocidad de provisionamiento y deprovisionamiento de los servicios en la red, reduciendo en gran medida los costes de gestión y mantenimiento de la red.
- **Restauración automática.** Permite la restauración automática del servicio utilizando otros recursos disponibles incluso después de hacer frente a varios fallos.
- **Calidad de servicio.** Los proveedores podrán prestar servicios con calidades de servicio personalizadas, pudiendo elegir desde los tiempos de restauración (50ms, 250ms, 500ms), el número de fallos ante los que se le puede proteger el servicio (uno o varios), o una protección mínima para tráfico de baja prioridad.

El plano de control de Ciena recibe el nombre de *OneConnect Intelligent Control Plane*.

OneConnect ofrece funcionalidades de valor agregado que van más allá de los estándares actuales del plano de control, de las redes ASON y del protocolo GMPLS. Estas funcionalidades incluyen:

- **FastMesh.** Es el mecanismo encargado de implementar la topología y la restauración de Malla. Se puede desarrollar independientemente o simultáneamente con los mecanismos de protección de línea OTN o SONET/SDH, consiguiendo así los altos niveles de disponibilidad de servicios. Por tanto, además de la APS (*Automatic Protection Switching*) Conmutación Automática de Protección de 50 ms a nivel de puerto o cliente, el sistema estará dotado de una jerarquía de protección de múltiples niveles que usa el plano de control para recuperar la red.
- **Agregación de enlaces.** Permite administrar varios enlaces establecidos entre dos nodos como si fuesen uno sólo. Esto permite la escalabilidad de redes inteligentes, tiempos de conmutación más cortos y simplifica la red.

- **Restauración de malla de tramo local (LSMR).** Permite tiempos de restauración más cortos. En respuesta a algún fallo en la red, las conexiones de subred normalmente se restauran desde sus nodos de origen mediante el uso de la funcionalidad de señalización en toda la red. La funcionalidad LSMR permite que las conexiones se restauren localmente, entre los nodos adyacentes a la rotura, aumentando así la velocidad de restauración del servicio.
- **Reencaminamiento automático.** Permite llevar a cabo reintentos continuos de restauración de las conexiones si se bloquea el intento inicial. Para cada intento se buscarán rutas alternativas utilizando cualquier capacidad disponible, de forma que la restauración funcionará aún en presencia de condiciones que cambien rápidamente y ante múltiples fallos.

En cuanto a la interoperabilidad del plano de control con el de otros fabricantes, Ciena ha participado en diversos foros que tratan estos temas, colaborando estrechamente en la definición de estándares. Ha demostrado su interoperabilidad basada en OIF E-NNI 2.0/ITU-T G.7713.2. Esta expansión partiendo del modelo de dominios ASON permite una implementación rápida y global de servicios en múltiples redes formadas por equipos de distintos fabricantes.

El plano de control desarrollado por Ciena es un plano de control distribuido, de manera que son los propios nodos los que descubren automáticamente la topología de la red y las funcionalidades de sus nodos vecinos, de manera que todos los nodos de la red tendrán la misma información de la red. Cualquier cambio será automáticamente enviado a todos los nodos para que todos tengan constancia de él.

La principal ventaja de este tipo de plano de control es que dota a la red de una mayor robustez y mejora la disponibilidad de los recursos frente a cambios en la red, ya que se adapta automáticamente a ellos. Pero también debemos tener en cuenta que en caso de redes de gran tamaño y con cambios de estado frecuentes conseguir esto puede ser difícil y por tanto, puede llegar a afectar su escalabilidad.

Los protocolos utilizados por Ciena para implementar el plano de control son:

- RSVP-TE (protocolo de reserva de recursos con ingeniería de tráfico) para señalización dentro y fuera de banda.
- OSPF-TE para el enrutamiento.

En cuanto a las calidades de servicio que ofrece para los distintos servicios:

- **High Fidelity.** Servicios que soportan baja latencia y bajo *jitter*. El algoritmo de enrutamiento elegirá la ruta que minimice la latencia.
- **Gold services.** En que el sistema buscará rutas alternativas en caso de fallo
- **Platinum services.** Requieren protecciones en menos de 50 ms, por lo que usa dos rutas con diversidad espacial que se reenrutarán en caso de fallo de una de ellas.

- **Unprotected.** Aquellos servicios que no requieren protección.

Ciena ha desarrollado dos tipos distintos de plano de control: el plano de control óptico, que recibe el nombre de *level 0-control plane* y el plano de control eléctrico, *level 1-control plane*.

En el caso del *level0-control plane* (plano de control de la capa óptica), se trabaja con los servicios a nivel OCh, llevándose a cabo la protección a nivel de *lambda*. A la hora de enrutar una *lambda* con problemas se tendrá en cuenta tanto los recursos disponibles como si esas rutas son válidas ópticamente hablando.

En el caso del *level1-control plane* (plano de control de la capa eléctrica), se basa en el crecimiento de la red a nivel de ODUk (*Optical Channel Data Unit*) y en el enrutamiento por ODU. Como se puede ver en la Figura 66, el plano de control eléctrico, aprovechando la capacidad de convergencia que tienen las interconexiones eléctricas, permiten agregar varios servicios en una única línea, con la consiguiente optimización del uso del ancho de banda de la red.

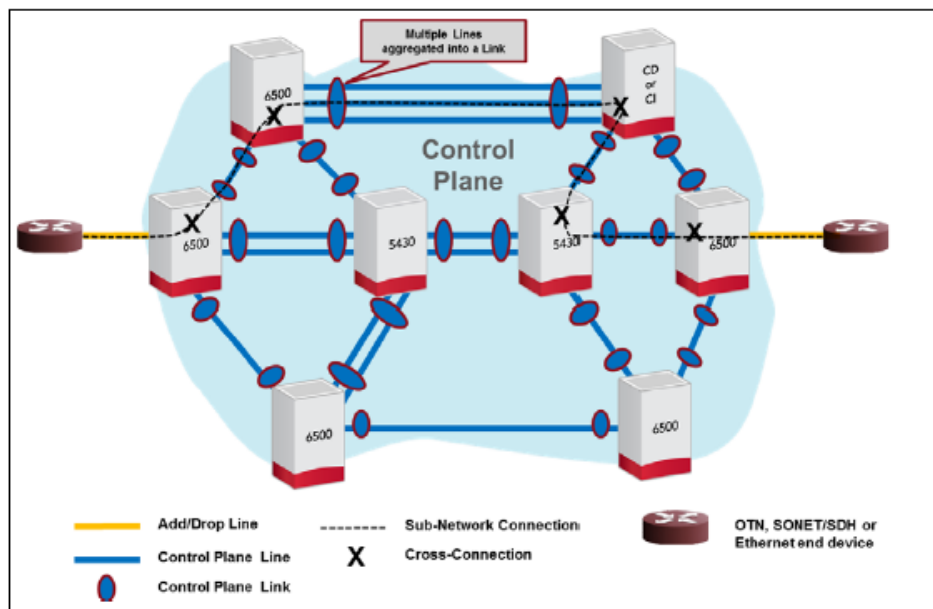


Figura 66: Plano de control eléctrico [12].

Los sistemas con plano de control requieren la reserva de capacidad en la red para poder llevar a cabo reenrutamiento de tráfico en caso de fallo. En el caso de plano de control eléctrico se transforma en la necesidad de tener *slots* vacíos en la trama que pudieran ser usados para esta función. Por el contrario, el plano de control óptico usa como capacidad de reserva las frecuencias no usadas del espectro, de manera que en caso de fallo las *lambdas* son reenrutadas en frecuencias no utilizadas.

Para la red en cuestión, al ser las *lambdas* de 10G y el tráfico tributario de la misma velocidad, si utilizásemos plano de control eléctrico, al no quedar *slots* libres para la reenrutación, sería necesario provisionar canales ópticos completamente vacíos con la consecuente infrautilización de recursos. Por ello, se ha decidido implementar en esta red un plano de control eléctrico que reenrute el tráfico en frecuencias no utilizadas.

Teniendo en cuenta las necesidades de tráfico explicado en la RFQ y las calidades de servicio disponibles para el plano de control Ciena, se recomendará al cliente para aquellos servicios en los que no sea un requerimiento obligatorio un tiempo de conmutación menor a 50 ms, en vez de implementar protecciones hardware, cree los servicios como *Gold Services* aprovechando así las funcionalidades del plano de control y con el consiguiente ahorro en el hardware que eso supone.

Aquellos servicios que no necesitan protección se configurarán como *unprotected*.

En cuanto al resto de las clases de servicios descritas, al no haberse especificado ningún requerimiento especial en cuanto al *jitter*, entendemos que de momento no sería necesario utilizar servicios *High Fidelity*. Por otro lado, y teniendo en cuenta que la topología descrita no permite más de una alternativa para el reenrutado, la implementación de servicios *Platinum* no tendría mucho sentido.

4.4. Requisitos del Sistema de gestión

En este apartado se van a describir las características del sistema de gestión elegido. A la hora de gestionar una red es muy importante que el personal de soporte de red disponga de un sistema de gestión amigable y potente, que le permita monitorizar la red y llevar a cabo todas las operaciones necesarias para su gestión y mantenimiento.

Continuando con la misma estructura que se ha seguido hasta ahora, se citarán los requisitos descritos en la RFQ y se explicará el comportamiento del sistema de gestión *OneControl*.

R.O.19.- El licitador incluirá en su oferta un sistema de gestión compuesto por el software, hardware, licencias, y otros elementos dispuestos por el fabricante necesarios para cubrir la gestión del total de equipamiento adquirido y la totalidad de sus funcionalidades, tanto requeridas como opcionales que no siendo requeridas hayan sido incluidas en la propuesta del licitador.

R.O.20.- Este sistema de gestión deberá permitir la provisión, operación y corrección de los servicios que se definan sobre el equipamiento adquirido.

R.O.26.- El sistema de gestión deberá disponer de un sistema de gestión de red y un gestor de elementos, ambos se podrán lanzar tanto de forma local como remota.

El sistema de gestión de Ciena recibe el nombre de *OneControl*. Su utilización permite una gestión completa de la red y de los servicios extremo-a-extremo definidos en ella para los equipos de Ciena.

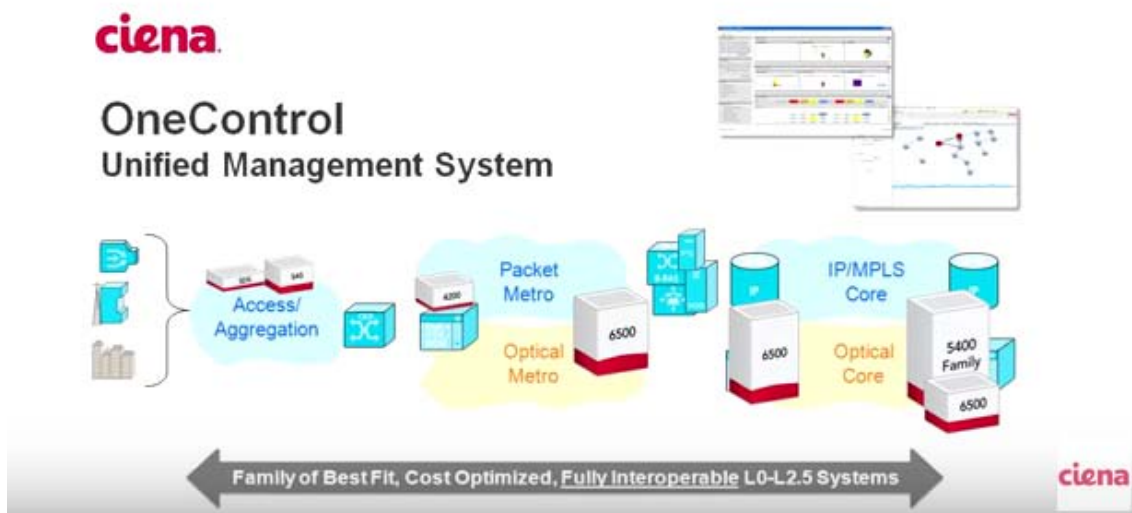


Figura 67: OneControlGestor de Ciena [19]

A través de un única interfaz gráfica de usuario y gracias a un modelo de gestión común, los centros de operación de red NOC (*Network Operations Center*) podrán llevar a cabo una gestión integral de la red, así como desplegar de una manera rápida nuevos servicios, que cruzarán a través de distintos dominios (*acceso, metro, core*) coordinados a través de distintos protocolos de distintos niveles de red (fotónico, transporte y paquete), asegurando un uso eficiente de los recursos de la red y una mayor optimización del uso del ancho de banda disponible. Permite la gestión de todas las funcionalidades de necesarias para implementar la red requerida (*directionless, colored, protecciones ...*).

Como se solicita en la R.O.20, la interfaz gráfica de OneControl permite activar servicios de la capa óptica (OTN/SDH/SONET), proporcionando, una vez que están creados, una visión completa del enlace extremo a extremo, así como de su relación con los distintos niveles de red, facilitando así el análisis de los problemas y la localización de los puntos de fallo.

Además de un gestor de red general, que puede ser utilizado en remoto desde cualquier punto con acceso a la red del sistema de gestión, la solución permite que de manera local en cada uno de los elementos de red se pueda utilizar un sistema de gestión independiente, de forma que se pueda configurar y comprobar el estado de ese equipo en local. Este recibe el nombre de **Site Manager**.

En cuanto al formato del interfaz gráfico de usuario:

R.O.27.- El sistema de gestión dispondrá un interfaz gráfico amigable y personalizable para el acceso a los equipos, que posibilite un acceso rápido a todas las secciones. Todas las acciones se realizarán desde este interfaz. El sistema permitirá distintas técnicas de representación de los elementos de la red, vista física y lógicas, configuración, canales configurados, estado de los distintos elementos, etc.

R.O.28.- El sistema de gestión generará gráficas e informes a partir de los datos almacenados. Estos datos también podrán ser exportados en algún formato estándar para su uso por otras aplicaciones.

OneControl ofrece al usuario una serie de opciones configurables que le permitirán adecuar su vista general a sus necesidades, ofreciéndole en una única pantalla una visión general de los aspectos más importantes de la red.

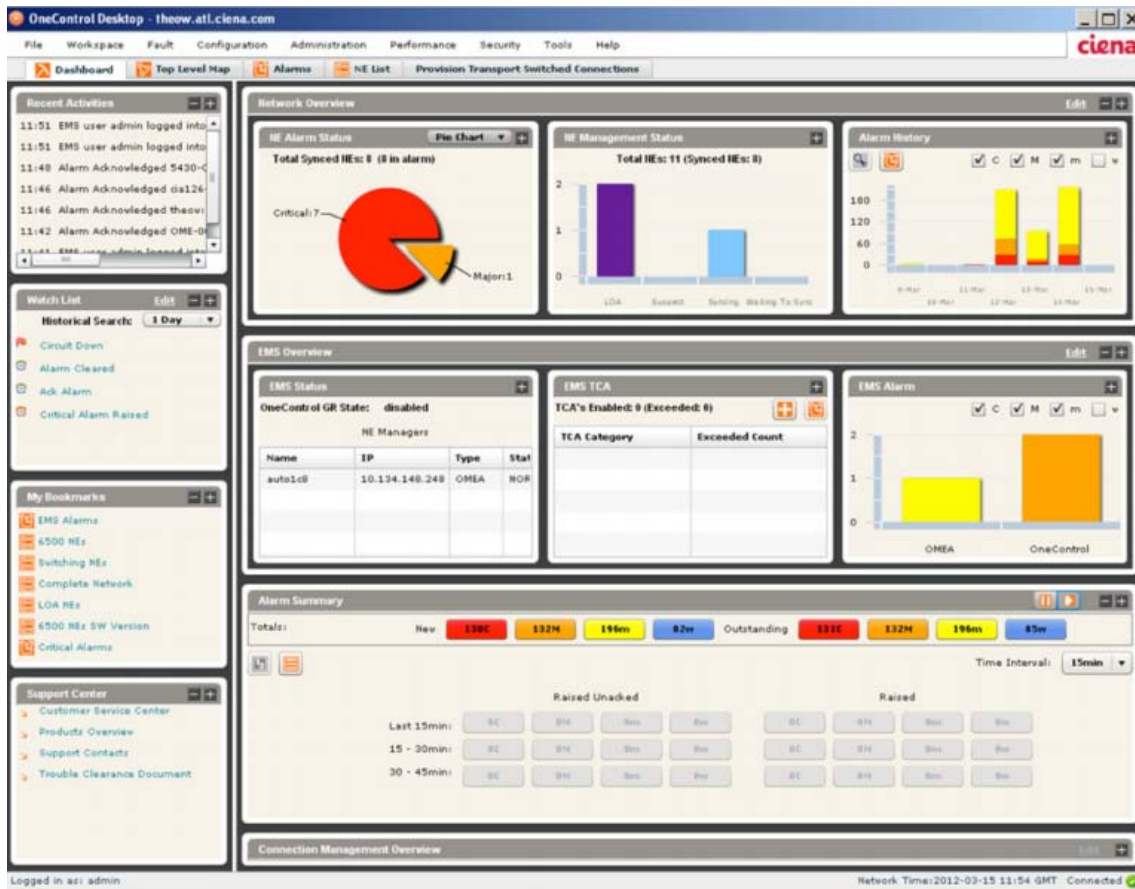


Figura 68: Visión panel principal del gestor OneConnect.[19]

Estado de las alarmas de los equipos: proporciona una visión a alto nivel del número de alarmas de la red y del número de equipos alarmados. Desde este menú se podrá ir directamente a los equipos alarmados.



Figura 69: Visión general de las alarmas en OneConnect.[19]

Estado de la gestión de los equipos: proporciona una visión general del estado de la gestión de los equipos. El usuario podrá obtener una lista de los nodos afectados por el estado que esté monitorizando.

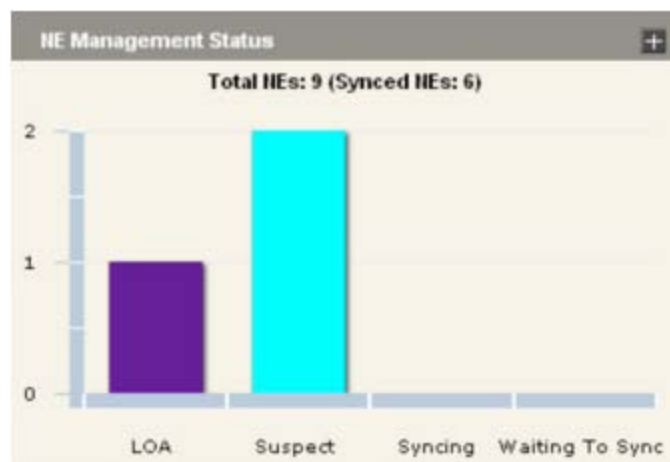


Figura 70: Visión general de la gestión de los equipos en OneConnect. [19]

Histórico de Alarmas: proporciona un gráfico con el histórico de alarmas de la red permitiendo al usuario filtrarlas por día o por hora.



Figura 71: Visión general del histórico de alarmas en OneConnect. [19]

Provisión restringida: permite al usuario comprobar de un vistazo los fallos de cualquier equipo que provoquen que la provisión en la red fotónica se vea bloqueada o reducida.

Provisioning Restricted		
Total Blocked IE: 1		
Node	Component	Time
OME_0784	DOC-22-2	2012-02-29 16:25:37 C

Figura 72: Visión de los equipos con provisión restringida en OneConnect. [19]

Estado de la fibra: proporciona al usuario una visión histórica y actual de los fallos de capacidad DWDM en la red.

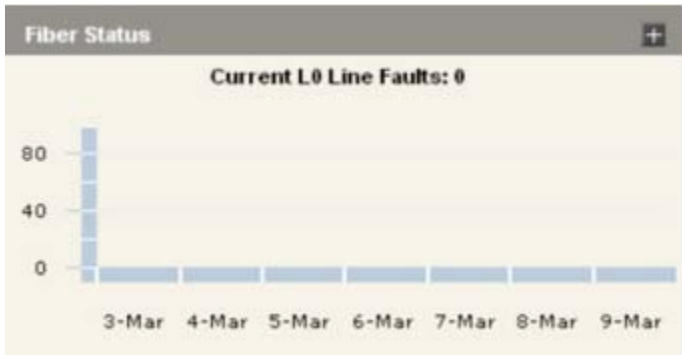


Figura 73: Visión general del estado de la fibra en OneConnect. [19]

R.O.30.- El sistema de gestión ofertado deberá ser capaz de generar una visión de la topología de red construida, de la cual ofrezca múltiples vistas, tanto físicas o lógicas como por dominios administrativos o geográficos. Además debe ser posible obtener mapas jerárquicos que proporcionen desde una visión global de la red a una visión específica por tarjeta o servicio.

R.O.22.-Identificación de servicios afectados ante incidencias o trabajos programados. Este requisito debe incluir todas las licencias necesarias para su activación y utilización.

El gestor está dotado de un mapa de topología jerárquico. Es una representación gráfica exacta del inventario de la red desplegada y de su topología.

Utiliza un código de colores para representar el estado de la red, lo que permitirá de un único vistazo la localización y aislamiento de fallos. Permite que el usuario definida las distintas vistas que le interesan, pudiendo hacer divisiones por topologías que le resulten interesante. También permite la distribución de forma jerárquica, pudiendo hacer más hincapié en aquellos aspectos que le resulten interesantes.

La gestión multinivel que realiza, permite correlar los fallos a través de la pila de protocolos desde la capa de transporte hasta la capa 3.

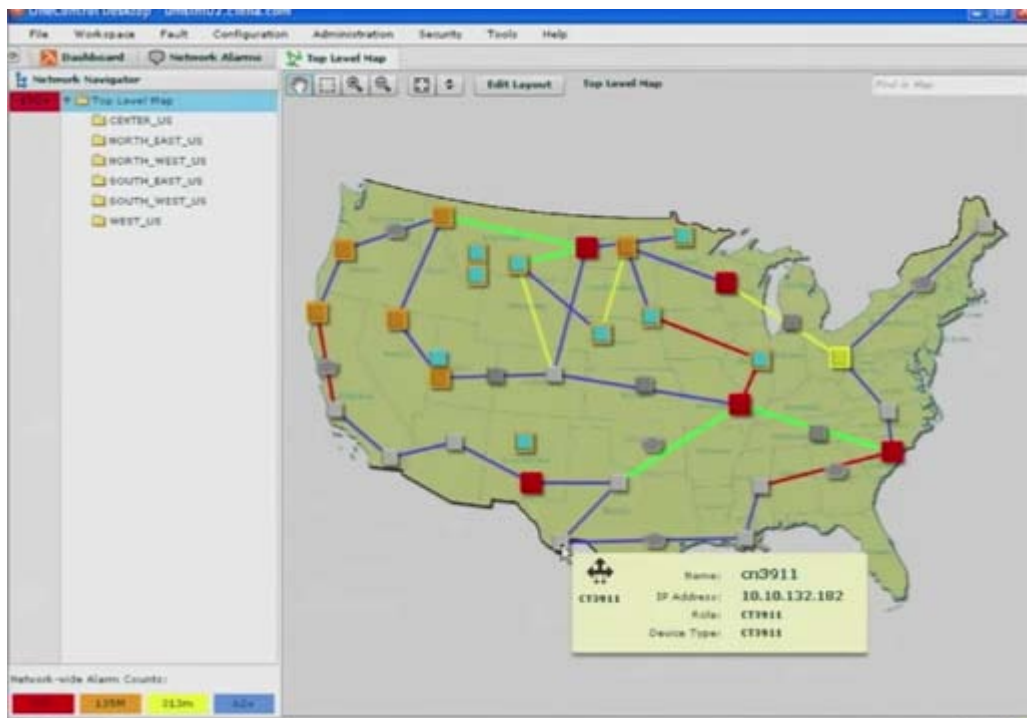


Figura 74: Visión general de la topología de red en OneConnect. [19]

R.O.24.- Deberá incluir interfaces abiertas, basadas en estándares, para permitir la integración con otras plataformas de gestión. El sistema de gestión permitirá exportar información a otros sistemas externos, entre otras, de alarmas, configuraciones (software y hardware) y de rendimiento

Este sistema de gestión soporta una integración perfecta con infraestructuras ya desplegadas a través de MTOSI (*Multi-Technology Operations Systems Interface*). Este interfaz definido entre sistemas operativos reduce los problemas de integración entre sistemas.

R.O.21.- Se requerirá que el sistema de gestión realice:

- *Provisión de canales de forma automática y dinámica.*
- *Provisión de canales de forma manual.*

- *Protección de canales.*

R.O.33.- Configuración o modificación remota de parámetros físicos y ópticos del equipamiento propuesto, para aplicar mecanismos preventivos y reactivos, por ejemplo, limitación física de potencia o apagado de láseres.

La gestión total de toda la red que realiza, permite a *OneControl* que, mediante un único comando ejecutado en el gestor, se cree un servicio extremo a extremo, no teniendo que crearlo de manera parcial como ocurre en otros muchos gestores.

También permite la configuración de alarmas y eventos basados en ciertos parámetros medibles por la red, de manera que, si el límite es sobrepasado, el operador se entere y por tanto pueda actuar en consecuencia.

R.O.23.- El sistema de gestión propuesto deberá ser único para todos los nodos y estar configurado de forma redundante, cada uno de ellos en ubicaciones físicas distintas y en alta disponibilidad.

Se recomienda la instalación de dos servidores redundantes para dar soporte a la red. Estos servidores estarán configurados en alta disponibilidad. Ambos servidores estarán continuamente sincronizados de manera que si el que está activo tiene algún problema, se pueda conmutar al que está actuando como secundario sin perder información.

Como doble protección, se recomienda que ambos servidores estén ubicados en emplazamientos distintos, dotándoles así también de redundancia geográfica.

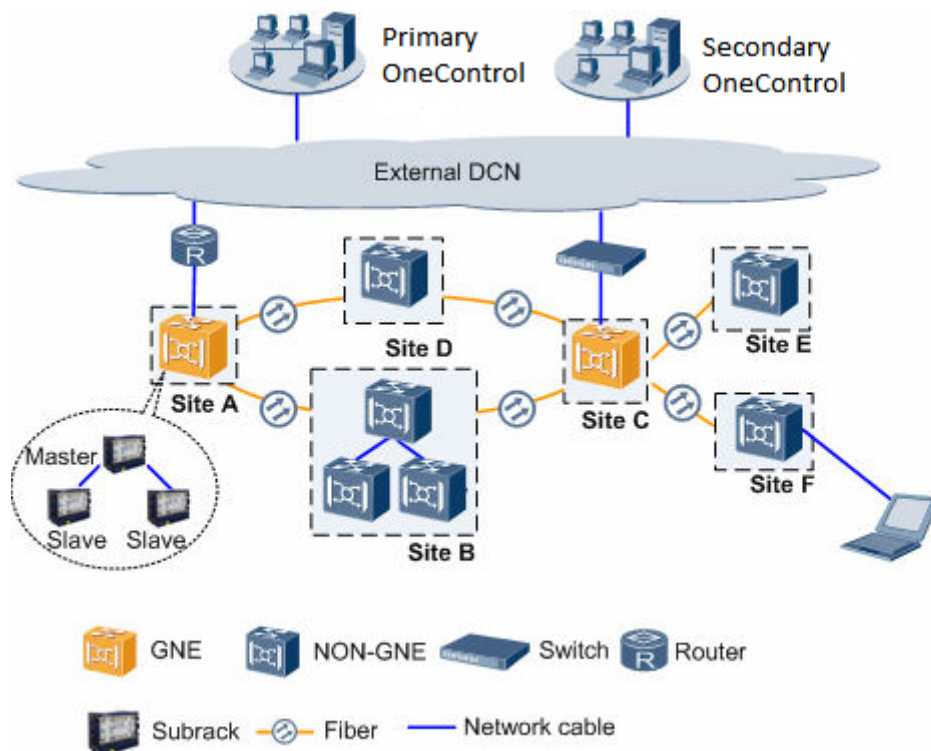


Figura 75: Sistema de gestión con Alta Disponibilidad. [19]

R.O.31.- El sistema de gestión deberá ser capaz de generar y mantener actualizado un inventario detallado de todo el equipamiento instalado objeto del presente procedimiento de adjudicación.

El sistema de gestión permitirá realizar distintos tipos de inventarios de red, desde inventarios de elementos de red hasta inventarios de las tarjetas que lo forman. Permitiendo que el usuario adecue la solicitud a la información que requiera en ese momento.

R.O.32.- El sistema de gestión deberá ser capaz, bien de mantener un histórico de configuraciones hardware y software anteriores, bien de proporcionar cualquier actualización de dicho inventario debido a sustituciones con posterioridad a la entrega, de tal modo que sistemas externos puedan mantener dicho histórico. En este último caso, la información se proporcionará en soporte digital, en un formato y protocolo que definirá el propio centro FCSCCL.

De manera periódica (a definir por el cliente) se guardaran las configuraciones y datos tanto del propio gestor como de los elementos de red que lo forman de manera que ante cualquier eventualidad puedan ser utilizados para restablecer la configuración.

5. Planificación y Presupuesto

Este capítulo presenta las fases del proyecto que se realizarán una vez que el diseño de la red ha concluido. En particular, se analiza la planificación del despliegue de la red haciendo referencia a los problemas que los despliegues de larga y media distancia conllevan. Finalmente, se hace referencia al presupuesto de dicho proyecto.

La planificación del despliegue implica la coordinación de recursos y personal necesarios para llevar a cabo la puesta en marcha de la red de una forma eficiente y efectiva en coste. Esta etapa del proyecto impacta directamente en el presupuesto final del proyecto, por lo que es necesario tratarla antes.

5.1. Planificación

En esta sección se realizará una enumeración de todas las actividades que deberán realizarse para completar el proyecto una vez que el diseño de la red ha terminado, la relación entre ellas y los hitos más importantes. También se realizará una estimación del tiempo que tomará cada una de ellas y así hacer una valoración de la duración total del proyecto.

Se asumirá como fecha de adjudicación del proyecto la presentación de esta memoria.

Las actividades que se deberán completar para finalizar el proyecto son:

- **Elaboración de la respuesta a la RFQ.** En este caso, cuando hablamos de repuesta a la RFQ, nos referimos a la elaboración de la memoria del proyecto. Por lo tanto, esta fase será más larga que lo que suele ser habitual (e.g por la inclusión del estado del arte).

La fase de respuesta de la RFQ se puede dividir en dos; por un lado, el tiempo que invierte el suministrador en elaborar la respuesta de la RFQ, que suele estar entre 2 y 3 semanas. Por el otro y una vez que se han entregado los proyectos, se pasa a una fase de revisión de la respuesta con el cliente, que se suele llevar a cabo durante el mes o los dos meses siguientes a la presentación de las ofertas, y en ella se defenderá la solución técnica presentada y se responderán todas las dudas del cliente.

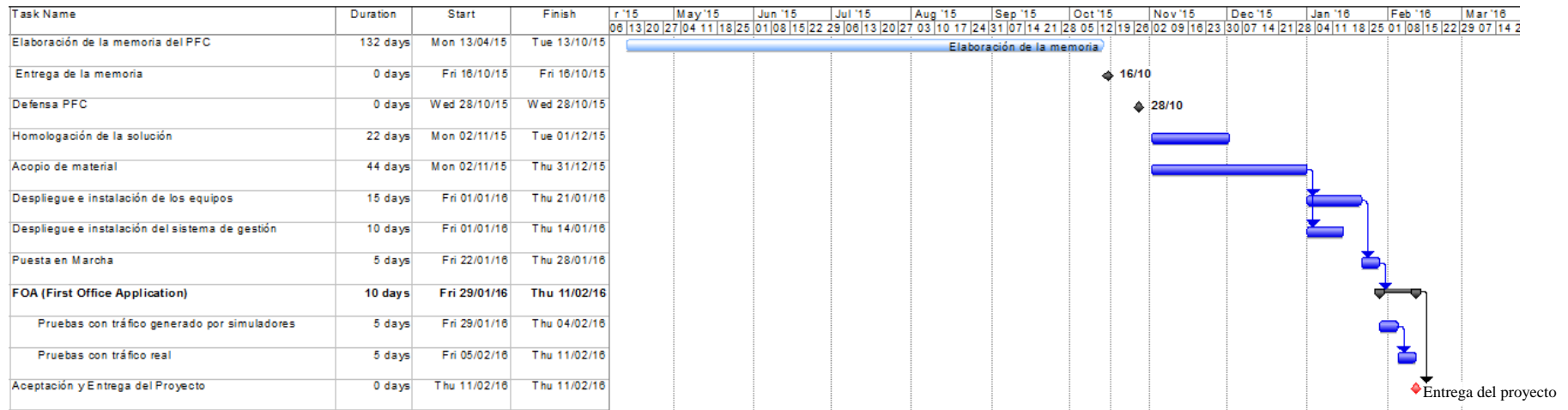
Como se ha explicado en esta ocasión, cuando hablamos de la actividad elaboración de la respuesta de la RFQ nos referimos a la elaboración de la presente memoria. Para este proceso se estima una duración de 6 meses, que comprenden desde el momento en el que se decidieron los requisitos del proyecto hasta la finalización de la presente memoria. Una vez definidos éstos, el siguiente paso fue encontrar una RFQ pública y actual, en la que apareciesen

representadas todas las características de la red que se querían explicar. Una vez hecho esto, y apoyándome en la bibliografía, se fueron completando las distintas soluciones explicadas en la memoria hasta llegar a la solución final. Como hitos de esta actividad destacan la **fecha de entrega de memoria**, que coincide con la fecha de presentación de ofertas de un proyecto normal y la **fecha de defensa proyecto final de carrera**, que equivaldría a la fecha de adjudicación de proyecto para una RFQ habitual.

- **Homologación de la solución.** Una vez aceptada la solución se deberá homologar en el laboratorio a través de la realización de pruebas conjuntas con el cliente. En el laboratorio se creará un entorno lo más parecido posible a la red real, y en él se implementará el plan de pruebas acordado con el cliente. Este plan de pruebas deberá incluir la verificación de las características funcionales, tanto obligatorias como opcionales propuestas por el suministrador, así como pruebas del correcto funcionamiento, tanto de los equipos como de los sistemas. Por último, se deberá demostrar la completa integración de los equipos y el sistema de gestión. Este proceso terminará con la validación de la solución y la consecuente **autorización para instalar en planta**. Se estima una duración de 1 mes para estas pruebas de homologación.
- **Acopio de material.** Esta es una actividad a la que quizá no se le da la relevancia que al resto, pero es imprescindible para poder cumplir los plazos establecidos con el cliente. Es muy importante que se haga acopio de todo el material necesario para la instalación de la red y así evitar retrasos innecesarios que redundarían en un aumento de costes y en una mala imagen de cara al cliente. Se estima un plazo de dos meses para poder reunir todo el material necesario. Esta actividad se realizará en paralelo a la homologación de la solución. La importancia de esta tarea reside en el concepto *Just-In-Time* (JIT). Actualmente, para reducir al máximo los costes de almacenamiento, los suministradores solamente están fabricando los productos cuando los van a necesitar. Esta práctica incrementa los tiempos de entrega al cliente pero es económicamente favorable para los suministradores. Los productos se fabrican en función de una estimación de las ventas para evitar grandes stocks, pero en muchas ocasiones esta estimación no es tan acertada como cabría esperar.
- **Despliegue e instalación.** Esta fase comprende el despliegue e instalación de todos los componentes físicos que conforman la red.
- **Despliegue del sistema de gestión.** Despliegue del sistema OneControl para la gestión de todos los elementos de la red. En un primer momento se instalarán los servidores para más tarde instalar la aplicación sobre ellos.
- **Puesta en Marcha.** En esta fase es en la que se pondrá en marcha la red propiamente dicha. Se llevará a cabo el ajuste de la red para que cumpla los requisitos ópticos
- **FOA (*First Office Application*).** En esta fase se intentará comprobar la estabilidad de la solución completa en planta. Se comprobará el funcionamiento tanto de los equipos como del sistema de gestión y su integración con otros sistemas externos que pueda tener el cliente. También se utilizará para

comprobar el correcto funcionamiento y coordinación entre los distintos grupos de trabajo que se encargarán de la gestión y mantenimiento de la red. La idea es encontrar los posibles fallos tanto de funcionamiento de los equipos como de los grupos humanos que darán soporte a la red para resolverlos antes de que se migre tráfico real a ella. Se dividirá en dos fases: una primera en la que aún no se habrá migrado el tráfico real, sino que todas las pruebas se harán con simuladores, y tras comprobar el correcto funcionamiento y migrar el tráfico, se mantendrá una semana más en observación. Una vez que se completa con éxito esta fase de pruebas, se da **la autorización de introducción en planta**, momento a partir del cual comienza la migración del tráfico.

- **Aceptación y entrega del proyecto.** Una vez que todas las fases anteriores estén completas y el cliente de visto bueno a la solución, se procederá a la entrega de la red al cliente, momento a partir del cual la gestión y mantenimiento de la red será responsabilidad suya. Este momento suele venir precedido de un traspaso de conocimientos, en el que el suministrador informará al cliente del funcionamiento de sus equipos, y le explicará los aspectos más importantes para llevar a cabo un correcto mantenimiento de su red.



5.2. Presupuesto

El principal escollo con el que nos hemos encontrado al intentar escribir este capítulo es que los catálogos de precios de los suministradores son totalmente confidenciales y solamente se le entregan a los potenciales clientes, por lo que tendremos que trabajar con valores estimados.

Afortunadamente, en la página web del gobierno del Estado de Nueva York existe un listado de precios de Ciena de julio del 2014. Ciena se presentó a un RFQ convocada por ellos y han decidido hacer pública la información, el enlace en el que se puede encontrar es http://www.ogs.ny.gov/purchase/prices/7701821350PL_Ciena.pdf.

Este será el listado de precios que se utilizará como referencia, como se puede ver en él, el suministrador decidió hacer un 48% de descuento sobre el precio de catálogo. Esta es una práctica bastante habitual entre los suministradores que dependiendo del interés que tengan en ganar un proyecto, de lo importante que sea el cliente, de las posibilidades de negocio futuro, captación de clientes futuros, etc. deciden aplicar un determinado descuento sobre el precio oficial.

Tomaremos como válido el descuento el aplicado al estado de Nueva York y aplicaremos el mismo a este proyecto, 48%.

Al tratarse de una licitación pública, la información relativa al proyecto incluye un presupuesto base de licitación, en este caso, dos millones trescientos noventa y nueve mil diecinueve euros (2.399.019 €).

El presupuesto base de Licitación tiene por finalidad obtener el importe total al que, según el criterio del técnico autor del proyecto, podrá ser ejecutado el proyecto, en el presupuesto base de licitación viene recogido tanto los costes del suministrador como el beneficio que espera obtener. También incluye el precio de los repuestos y de los servicios asociados a la red, pero, al no ser objeto de este proyecto no los tendremos en cuenta.

Para configurar el presupuesto vamos a seguir la misma estructura que hemos seguido al dar la solución, e iremos explicando el coste de cada una de las implementaciones escogidas.

ROADMS

- **ROADM de 4 vías de línea con 2 vías locales.** La configuración conseguida será *directionless* y *colored*. Como se explicó en el Capítulo 4, consta de 6 tarjetas WSS de 5x1 puertos y 6 tarjetas MLA.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
WSS 5x1	6	47.250,00 \$	283.500,00 \$
MLA	6	22.275,00 \$	133.650,00 \$
			417.150,00 \$

Tabla 1: Presupuesto ROADM de 4 vías

Según el diseño final elegido, esta configuración se aplicará en ULE, USAL, UVA y UBU.

- **ROADM de 3 vías de línea con 2 vías locales.** La configuración conseguida será *directionless* y *colored*. Como se explicó en el Capítulo 4, consta de 6 tarjetas WSS de 5x1 puertos y 6 tarjetas MLA.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
WSS 5x1	5	47.250,00 \$	236.250,00 \$
MLA	5	22.275,00 \$	111.375,00 \$
			347.625,00 \$

Tabla 2: Presupuesto ROADM de 3 vías

Según el diseño final elegido, esta configuración se aplicará en UVASG.

- **ROADM de 2 vías de línea con 2 vías locales.** La configuración conseguida será *directionless* y *colored*. Como se explicó en el Capítulo 4, consta de 4 tarjetas WSS de 5x1 puertos y 4 tarjetas MLA.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
WSS 5x1	4	47.250,00 \$	189.000,00 \$
MLA	4	22.275,00 \$	89.100,00 \$
			278.100,00 \$

Tabla 3: Presupuesto ROADM de 2 vías

Según el diseño final elegido, esta configuración se aplicará en USALZA, USALAV y UVAPA.

- **ROADM de 1 vías de línea con 2 vías locales.** La configuración conseguida será *directioned* y *colored*. Como se explicó en el Capítulo 4, consta de 1 tarjeta WSS de 5x1 puertos, 1 tarjeta MLA y 1 tarjeta CMD44.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
WSS 5x1	1	47.250,00 \$	47.250,00 \$
MLA	1	22.275,00 \$	22.275,00 \$
CMD44	1	26.550,00 \$	26.550,00 \$
			96.075,00 \$

Tabla 4: Presupuesto ROADM de 1 vías

Según el diseño final elegido, esta configuración se aplicará en ULEPO, USALBE y UVASO.

Número de canales

Según se explicó en la parte de diseño, se desplegará una solución inicial de 44 canales dejándose abierta la posibilidad de ampliación a 80 lambdas en un futuro. Para los nodos que se quedan fuera del anillo una configuración de 16 lambdas será suficiente.

- **Solución inicial de 44 lambdas**

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
CMD44	1	22.275,00 \$	22.275,00 \$
BMD2	1	1.237,50 \$	1.237,50 \$
			23.512,50 \$

Tabla 5: Presupuesto solución de 44 *lambdas*

Según se especifica en los requisitos, esta configuración debería ser desplegada en ULEON, USALZA, USAL, USALAV, UVASG, UBU, UVAPA Y UVA.

- **Solución inicial de 16 *lambdas***

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
CMD44	1	22.275,00 \$	22.275,00 \$
BMD2	1	1.237,50 \$	1.237,50 \$
			23.512,50 \$

Tabla 6: Presupuesto solución de 16 *lambdas*

Como se especifica en los requisitos, esta solución debe ser desplegada en ULEPO, USALBE y UVASO.

Se puede observar que la configuración para la solución de 44 lambdas y de 16 lambdas elegidas es la misma, se ha decidido contemplar las dos en el presupuesto para mantener la misma estructura que en la memoria.

- **Solución adicional 88 lambdas**

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
CMD44	2	22.275,00 \$	44.550,00 \$
BMD2	1	1.237,50 \$	1.237,50 \$
			45.787,50 \$

Tabla 7: Presupuesto solución de 88 *lambdas*

Esta configuración se irá aplicando según las necesidades de tráfico así lo vayan exigiendo.

Transpondedores

Como se explico en los requisitos, estas redes soportarán dos tipos de tráfico, de 10G y de 1G, el precio que se especifica aquí es por enlace.

- **Canal de 10G**

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
OTR	2	7.990,00 \$	15.980,00 \$
Módulo XFP 10G	2	2.345,75 \$	4.691,50 \$
			20.671,50 \$

Tabla 8: Presupuesto canales de 10G

Como se puede ver en las matrices de tráfico los enlaces de 10G requeridos en la RFQ son 39.

- **Canal de 1G.** Como se ha explicado en el Capítulo 4, esta solución consta de 8 puertos GbE. Para hacer la solución más económica, las tarjetas WL1 y MOTR se colocaran en *slot* adyacentes y por tanto no será necesaria la instalación de una tarjeta XC.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
WL1	1	1.125,00\$	1.125,00\$
MOTR	1	15.750,00\$	15.750,00\$
Módulo XFP	1	210,00\$	210,00\$
			17.085,00\$

Tabla 9: Presupuesto canales de 1G

Tras analizar las matrices de tráfico, para dar cabida a todo el tráfico requerido, sería suficiente con instalar un grupo de WL1+OTR por dirección en los nodos del anillo (8 nodos*2 grupos), y un único grupo para los equipos que quedan fuera de él (3 nodos * 1 grupo).

Protección

Como se explicó en el Capítulo 4, la protección 1+1 a nivel de capa óptica se implementará usando una tarjeta OPS, que dividirá la señal OCh a la salida de los transpondedores/muxponders.

Tipo tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
OPS	2	2.875,00 \$	5.750,00\$
			5.750,00\$

Tabla 10: Presupuesto protección 1+1

El precio se ha dado para dos unidades ya que se necesitará una tarjeta OPS en cada extremo para poder proteger el servicio. En la RFQ se especifica que serán 10 los enlaces a proteger.

Armazones y tarjetas auxiliares

- **Armazones**

Armazón	Unidades	Precio Unitario	Total
6500-14	8	3.850,00 \$	19.250,00 \$
6500-7	3	2.392,50 \$	7.177,50 \$
			26.427,50 \$

Tabla 11: Presupuesto armazones

En los nodos principales ULEON, USALZA, USAL, USALAV, UVASG, UBU, UVAPA Y UVA se usaran los bastidores 6500-14, y en el resto ULEPO, USALBE y UVASO se instalaran los 6500-7.

- **Tarjetas auxiliares**

A parte de las tarjetas propias de cada nodo, existen unas tarjetas comunes que deberán estar instaladas en todos los nodos.

Por un lado se encuentran las tarjetas “*Shelf processor*”. Esta tarjeta lleva a cabo funciones de comunicación y control, trabaja junto con el sistema de gestión OneControl en la gestión de cada una de las tarjetas del equipo, y también se encarga de la comunicación interna entre ellos.

Por el otro lado, las tarjetas “*Front Panel*”, añaden al sistema los interfaces Ethernet auxiliares necesarios para llevar a cabo las conexiones con el sistema de gestión y para permitir las conexiones en local al equipo.

Tarjeta	Unidades	Precio Unitario	Total
Shelf Processor	11	2.860,00 \$	31.460,00 \$
Front Panel	11	375,00 \$	4.125,00 \$
			35.585,00 \$

Tabla 12: Presupuesto tarjetas auxiliares

Plano de Control

Para poder habilitar la funcionalidad del plano de control es necesario instalar licencias en cada nodo

Funcionalidad	Unidades	Precio Unitario	Total
Plano de Control	11	15.384,00\$	174.174,00\$
			174.174,00\$

Tabla 13: Presupuesto implementación Plano de Control

Gestor

En cuanto a la instalación del gestor, son varios los aspectos a tener en cuenta. La instalación de los servidores, dos al haberse configurado en alta disponibilidad, la

aplicación OneControl y las licencias que se deben instalar en cada nodo para poder gestionarlo.

Servidor	Unidades	Precio Unitario	Total
Oracle T4-2	2	13.000,00\$	26.000,00\$
			26.000,00\$

Tabla 14: Presupuesto servidores.

Aplicación	Unidades	Precio Unitario	Total
OneControl	1	15.000,00\$	15.000,00\$
			15.000,00\$

Tabla 15: Presupuesto aplicación OneControl

Aplicación	Unidades	Precio Unitario	Total
Licencias	11	500,00\$	5.500,00\$
			5.500,00\$

Tabla 16: Presupuesto licencias OneControl

Presupuesto total del equipamiento

	Unidades	Precio Unitario	Total
ROADM 4 vías	4	417.150,00 \$	1.668.600,00 \$
ROADM 3 vías	1	347.625,00 \$	347.625,00\$
ROADM 2 vías	3	278.100,00 \$	834.300,00\$
ROADM 1 vías	3	96.075, 00 \$	288,225,00\$
Solución 44 lambdas	8	23.512,50 \$	188.100,00\$
Solución 16 lambdas	3	23.512,50 \$	70.537,50\$
Canales 10G	39	20.671,50 \$	806,188,50\$
Canales 1G	19	17.085,00\$	324.615,00\$
Protección	10	5.750,00\$	57.500,00\$
Bastidores	1	26.427,50 \$	26.427,50\$
Tarjetas auxiliares	1	35.585,00 \$	35.585,00\$
Plano de Control	1	174.174,00 \$	174,174,00\$
Servidores gestor	1	26.000,00\$	26.000,00\$
OneControl	1	15.000, 00\$	15.000,00\$
Licencias equipos	1	5.500,00\$	5.500,00\$
			4.868.377,50\$

Tabla 17: Presupuesto total del equipamiento

Coste de instalación

Por último, nos quedaría valorar el coste de la instalación de esta red. Este coste incluye tanto el coste de los recursos humanos que llevarán a cabo la instalación como el de las herramientas y equipos que utilicen. Se estima que este coste representa un 10% del coste total del hardware.

Coste hardware	Coste instalación	Total
4.868.377,50\$	10%	5.355.215,25\$

Tabla 18: Presupuesto instalación

Como se ha explicado al comienzo, vamos a suponer que Ciena decide hacer un descuento del 48% respecto al precio de catálogo, siendo por tanto el valor final:

Valor Inicial	Descuento	Valor final
5.355.215,25\$	48%	2.784.711,93 \$

Tabla 19: Coste total del proyecto

Realizando la transformación a euros con el cambio actual, 1 euro es 1.14 dólares, el coste total del proyecto sería de **2.442.729, 76 euros**.

Este valor es bastante cercano al presupuesto de la licitación, quedaría en manos del fabricante el aplicar un descuento mayor si lo cree oportuno.

6. Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones

El trabajo presentado en este proyecto de fin de carrera ha girado en torno al diseño de una red WDM basada con plano de control ASON y tecnología OTN. Durante la realización del presente proyecto se han podido comprobar las ventajas de la utilización de redes WDM malladas con plano de control, y las de la tecnología OTN frente a las tecnologías que se han venido usando tradicionalmente, las redes WDM punto-a-punto o en anillo y las tecnologías PDH o SDH.

La introducción de este nuevo tipo de redes ha permitido a los suministradores adaptarse a los nuevos requisitos de tráfico que deben soportar las redes de transporte actuales, permitiendo el transporte de señales WAN o IP (basadas en conmutación de paquetes) sobre las redes de transporte, basadas principalmente en conmutación de circuitos. Gracias a la utilización del plano de control, se ha podido implementar el concepto de calidad de servicio en conmutación de paquetes, algo impensable hasta ahora para este tipo de redes. También ha permitido llevar a cabo la gestión, operación y mantenimiento de una forma más rápida y dinámica, y en muchas ocasiones sin implicar el desplazamiento de un técnico.

Por otro lado, la principal ventaja de haber introducido la tecnología OTN en estas redes, es el aumento de la eficiencia que por su modo de funcionamiento, permite introducir el tráfico completando la capacidad de longitudes de onda que ya estaban siendo usadas. Otra de las ventajas a tener muy en cuenta, es el carácter universal de esta jerarquía, que favorece la interoperabilidad entre redes de distintos suministradores.

En el Capítulo 2 del presente proyecto se ha hecho un resumen general de los fundamentos teóricos en los que se basan las redes de transporte actuales, de manera que puede ser consultada y entendida por cualquier persona que quiera tener una visión global de ellas, aunque no posea conocimientos previos del tema. Asimismo, se ha dado mucha importancia a explicar de una manera práctica y didáctica todos estos conceptos, para que se pudiesen entender todas las decisiones tomadas a lo largo de la parte de diseño.

Basándose en estos fundamentos, se han analizado las posibles topologías de red disponibles con las tecnologías actuales explicadas en el capítulo 3. Este análisis ha estado centrado en torno a los nodos más importantes de una red de transmisión; los ROADMs. Dependiendo del grado de flexibilidad y reconfigurabilidad deseado, se pueden emplear distintos tipos de ROADMs, clasificados como *colored*, *directioned*, *colorless*, *directionless* y *contentionless*.

Las posibles implementaciones de estos tipos de ROADM han sido explicadas en las secciones 3.1.1.1, 3.1.1.2, 3.1.1.3, 3.1.1.4 y 3.1.1.5; descartando los tipos *directioned*,

colorless y *contentionless* por no cumplir los requisitos de la red a diseñar en términos técnicos o económicos.

Una vez que se ha elegido la topología tanto de la red como de los nodos ROADM, se ha presentado un diseño detallado de cada uno de los nodos de la red a diseñar en el Capítulo 4. Dicho diseño se ha realizado de una manera desglosada, refiriéndose a cada uno de los requisitos técnicos de la RFQ.

Durante el diseño de la red ha quedado patente la importancia de conocer bien las características de la red que se va a implementar. Adaptarse a las necesidades actuales a la vez que se tienen en cuenta las evoluciones futuras, permitirá el ahorro de costes innecesarios y por tanto una mayor satisfacción del cliente. No se debe perder de vista el hecho de que a la hora de elegir un suministrador, una de los puntos que se tendrá muy en cuenta será la relación entre el coste del proyecto y las funcionalidades que ofrece.

Finalmente, una vez el diseño detallado ha sido completado, se ha realizado un presupuesto económico del proyecto en el Capítulo 5. Este presupuesto incluye, tanto la inversión en hardware, como los servicios relacionados para la instalación y puesta en marcha de la red.

Este proyecto ha emulado el proceso de respuesta a una RFQ, de forma que permite obtener una visión bastante aproximada del modo de trabajo de las empresas de telecomunicaciones respecto a las adjudicaciones de proyectos, puesto que es muy difícil obtener esta visión para las personas ajenas a este campo.

6.2. Trabajos Futuros

Tal y como se ha realizado el diseño, el sistema es susceptible de aumentar su capacidad hasta 88 *lambdas* y los canales de 100G de los que ya se habla en el RFQ. Se entiende por tanto que la evolución de esta red irá en la misma dirección que la del resto de redes WDM.

Como se ha explicado en el Capítulo 2, el reto más importantes al que se enfrentan estas redes, y al que se seguirán enfrentando un futuro, es el de adaptarse a las demandas de aumento de tráfico. Para dar respuesta a esas necesidades que van desde los 400Gbps hasta 1 Tbps se va utilizar una estrategia de transmisión diferente a la usada hasta ahora. La introducción de este tipo de canales requeriría un cambio significativo en la asignación de frecuencias, por lo que requeriría un rediseño.

Como se ha explicado a lo largo del proyecto, las redes WDM actuales transmiten señales ópticas de 10G, 40G y 100G como una única señal portadora que se ajusta a un ancho de banda estándar de 50GHz. El cambio de estrategia aplicado para velocidades desde los 400G hasta 1T, consiste en sustituir esta única portadora por varias subportadoras para transmitir los datos, recibiendo el nombre de *superchannels*.

Aunque se transmitan a través de varias portadoras, cada *superchannel* se considerará, provisionará, transmitirá y gestionará como una única entidad. Son dos las técnicas de modulación que se utilizan para la implementación de estos canales: DP-QPSK para las redes de larga distancia por su mayor alcance, y DP-16QAM para redes metropolitanas.

Pero debemos entender que este cambio no se apoyará solamente en los cambios de modulación, una gran influencia la tendrá la aparición de un nuevo concepto, la rejilla flexible. Esta nueva estrategia contribuirá a mejorar en gran medida la eficiencia espectral.

El patrón de rejilla fija de 50 GHz ha sido muy útil durante mucho tiempo. Ayudaba a planificar los servicios, su capacidad y a identificar los recursos disponibles de una forma fácil y clara. Otro punto importante, es que la tecnología de multiplexación/demultiplexación AWG utilizada para el add/drop de los canales de los ROADMs se adapta muy bien a las redes basadas en las rejillas fijas de 50GHz.

El concepto de rejilla flexible queda definido en la recomendación G.941.1 [32]. Aunque recibe el nombre de rejilla flexible, realmente se basa en patrones de 12.5 GHz, que son más compatibles con tamaños de canales mixtos. Su utilización mejora la eficiencia espectral, haciendo coincidir más estrechamente el tamaño del canal con las señales que se transportan. También redundante en una mejora del filtrado que permite a las portadoras ser transportadas más estrechamente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Isabel Pérez, “Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos: Técnicas de Multiplexación”, Dpto. de Tecnología Electrónica, Universidad CARLOS III de Madrid.
- [2] Dpto. Electrónica IEFPS Tartanga, “Fundamentos de las fibras ópticas”, Proyecto innovación sobre fibra y redes, Bizkaia, Febrero 2014.
- [3] Paul Littlewood, Fady Masoud. “Expert’s Guide to Optical Transport Networks: Optical Transport Networking.” Ciena. Hanover, 2014
- [4] Fernando Nunez, “Tecnologías que Soportan Redes de Nueva Generación”, Reunión de Primavera CUDI, Chiapas, 2008
- [5] ITU-T, G.709/Y.1331 “Interfaces for the Optical Transport Networks”, 02/2012
- [6] Infinera, “White Paper: Coherent DWDM Technologies”. Infinera, Sunnyvale, 2012
- [7] Diego Escobar Aguirre, “Técnicas de modulación para enlaces ópticos”, Universidad Mayor, 2013
- [8] Sheldon Walklin, “ROADMs in Next-Generation Networks”, Optelian, Septiembre 2013
- [9] Infonetics, “ROADM Evolves: Should you be paying attention?”, California, 2006.
- [10] Fujitsu, “CDC ROADM Applications and Cost Comparison”, Texas, 2014
- [11] JDSU, “A performance Comparison of WSS Engine Technologies”, 2009
- [12] Nik Larkin, “ASON and GMPLS - The Battle Of The Optical Control Plane”, Metaswitch Networks, England, 2002
- [13] Fernando Agraz Bujan, “Advanced Routing Mechanisms in ASON/GMPLS Networks”, Universidad Politécnica de Cataluña, 2012
- [14] Unión Internacional de Telecomunicaciones, ITU-T G.8080/Y.1304, “Arquitectura de la red óptica con conmutación automática”, 2011
- [15] ITU-T G.872, “Architecture of optical transport networks”, 2012
- [16] ITU- T G.798, “Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks”, 2002
- [17] Google: <https://www.fcsc.es/index.php/perfil-del-contratante/licitaciones-cerradas/254-fcsc1-02-2014> [Último acceso 16/10/2015]

[18] Ciena, “6500 PACKET-OPTICAL PLATFORM: Transforming Networks into Intelligent Programmable Platforms”, Maryland, 2015

[19] Ciena, “ONECONTROL: Management the way it should be”, Maryland, 2013

[20] Google: http://www.ogs.ny.gov/purchase/prices/7701821350PL_Ciena.pdf
[Último acceso 16/10/2015]